

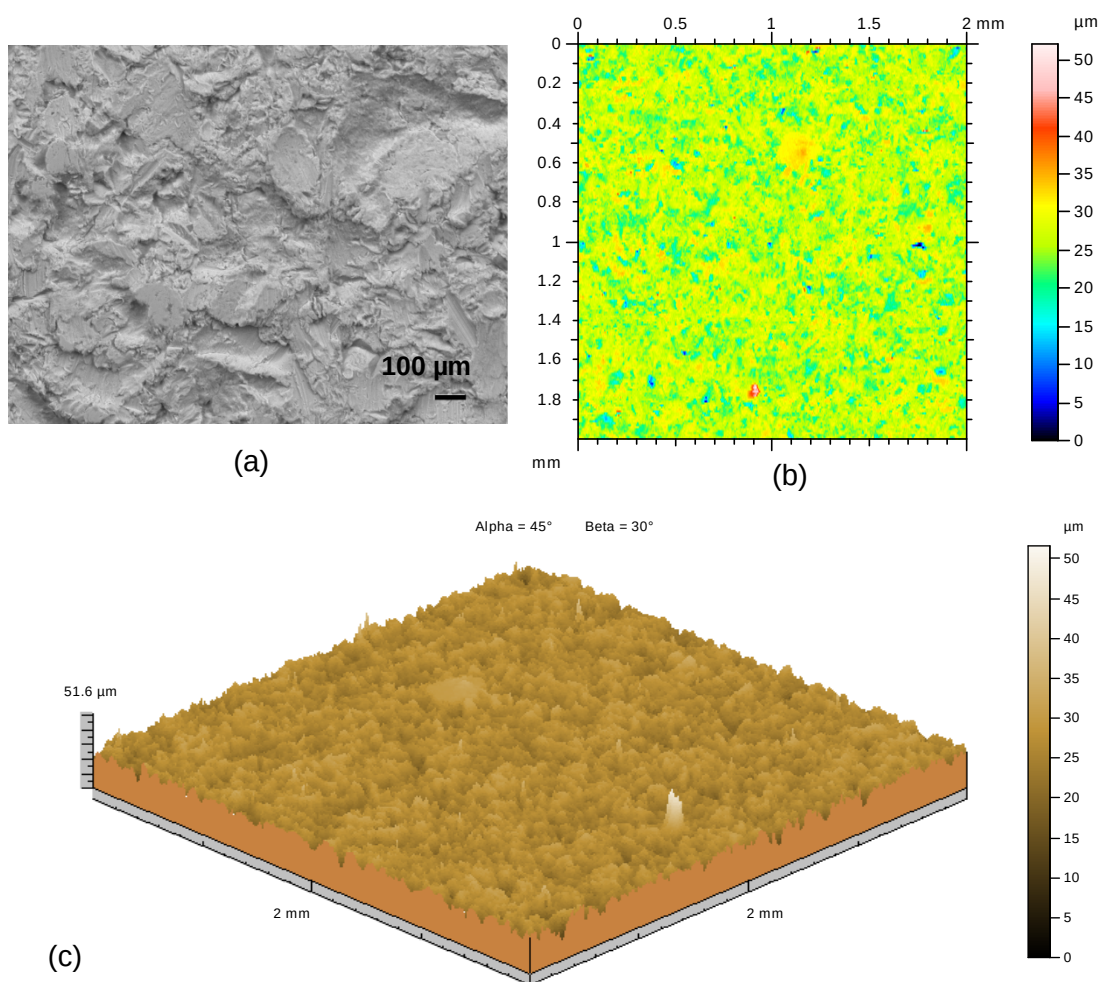


Figura 5.50 – Topografia AF2, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

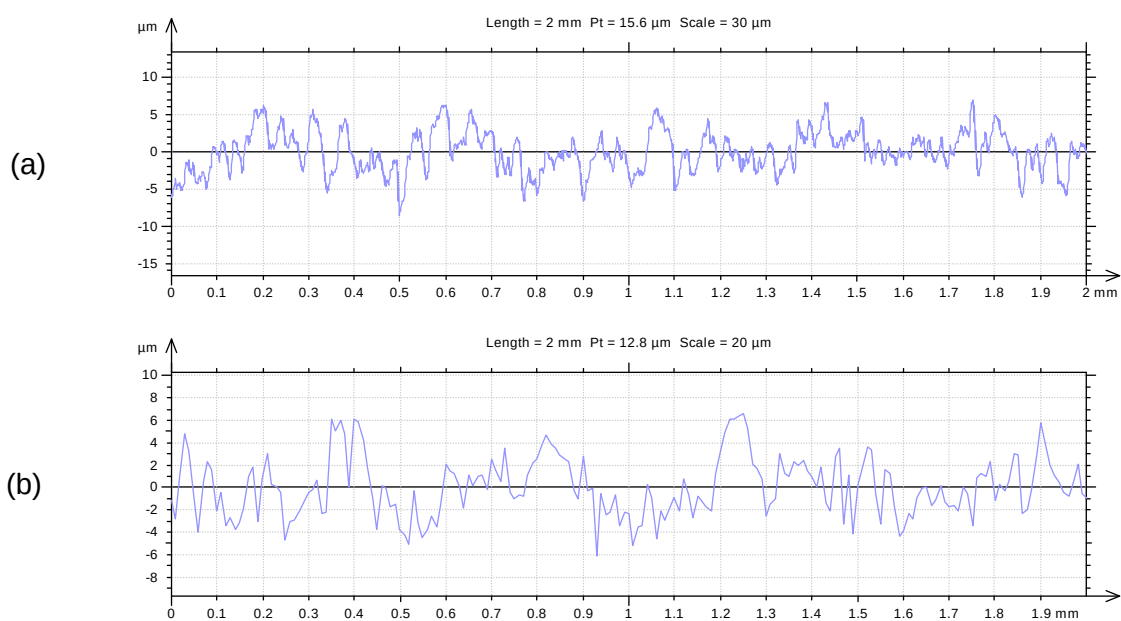


Figura 5.51 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para AF2

Na Figura 5.50, nota-se a presença de alguns picos isolados, refletidos pelas ampliações em alguns valores dos parâmetros de rugosidade. O mais notável é a diferença de valores entre S_t de 52,10 μm para a área total.

Como a amostra AF2 apresentou uma perda de massa muito superior, provavelmente os sulcos formados são profundos, com predominância de picos elevados (ver Fig 5.50 c e Fig. 5.51 b).

A Figura 5.52 exhibe a variação para S_a e S_q , com relação à taxa de erosão para os ensaios em MIG/MAG arame frio.

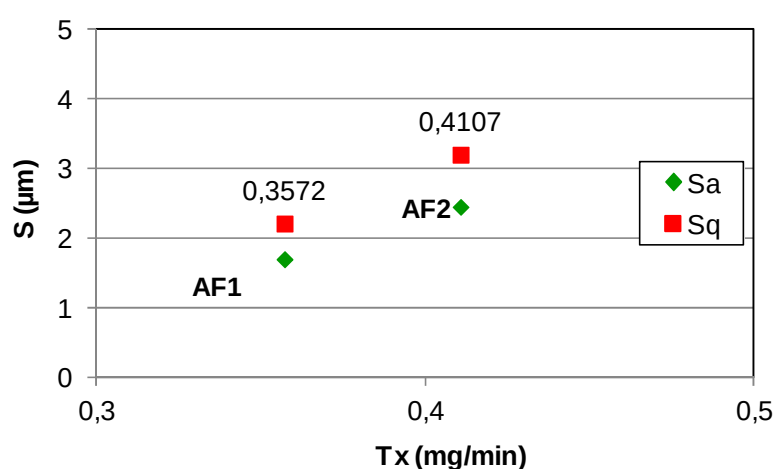


Figura 5.52 – Variação da rugosidade (S_a e S_q) com a taxa de erosão

No caso da amostra AF2 com taxa de erosão de 0,41 mg/min, a elevação na perda de massa refletiu em um perfil com maior amplitude de picos e vales, assim como exibiu um aumento nos parâmetros S_q e S_t . Conforme já discutido, a superfície para o ensaio de erosão a 90° é altamente deformada e encruada, formada por crateras, decorrentes dos sucessivos impactos das partículas erosivas. Ainda segundo Camacho et al. (2013), superfícies menos desgastadas apresentam menores valores de parâmetros de rugosidade, fato comprovado para o MIG/MAG arame frio através da Fig. 5.52.

5.4.2. Amostras do processo MIG/MAG duplo arame paralelo

Para as amostras soldadas pelo processo MIG/MAG duplo arame paralelo, os resultados em termos de topografia são apresentados neste tópico, acompanhando a sequência dos ensaios DA1 à DA4.

Na Figura 5.53, tem-se a característica da topografia para o corpo de prova DA1. A Figura 5.54 apresenta o perfil de rugosidade linear nas direções leste oeste e norte sul.

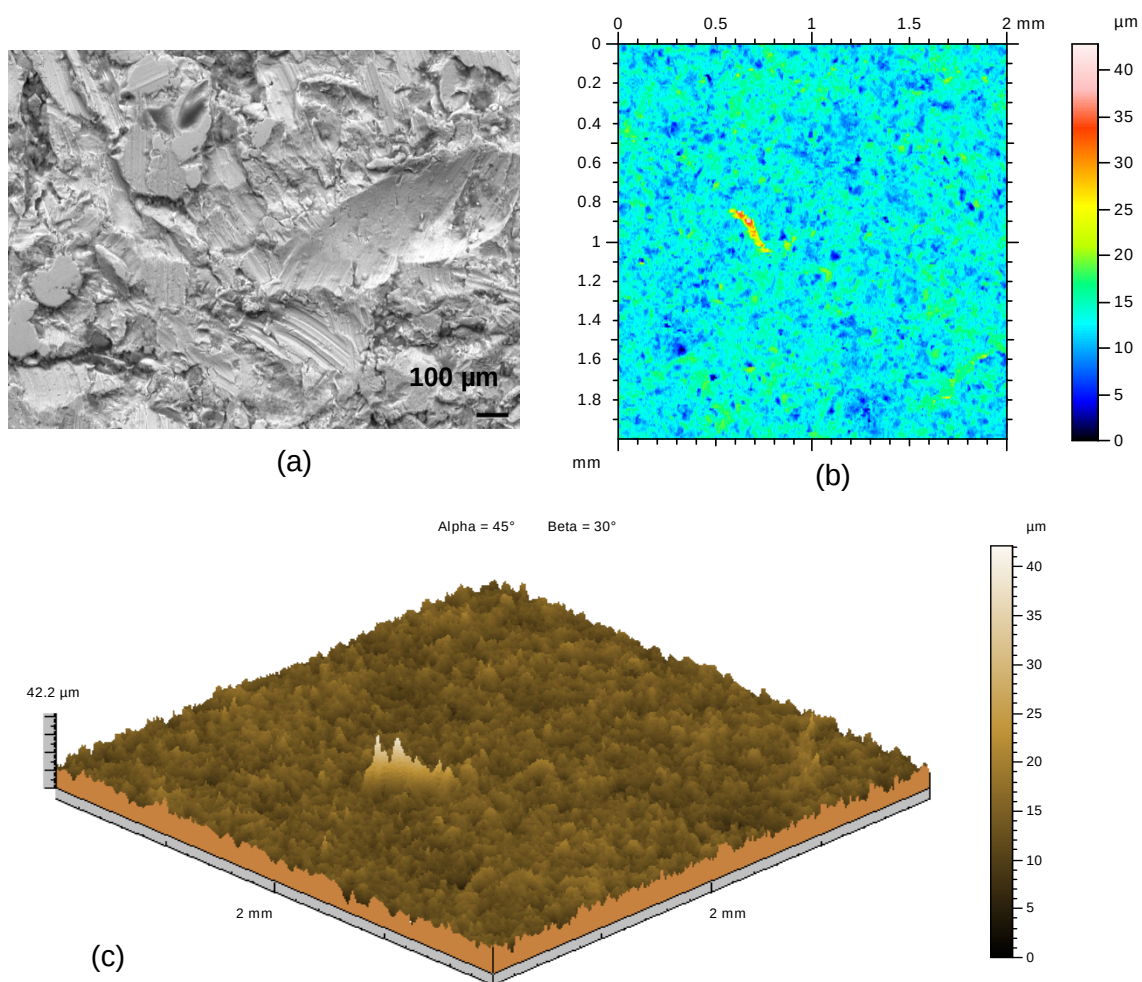


Figura 5.53 – Topografia DA1, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

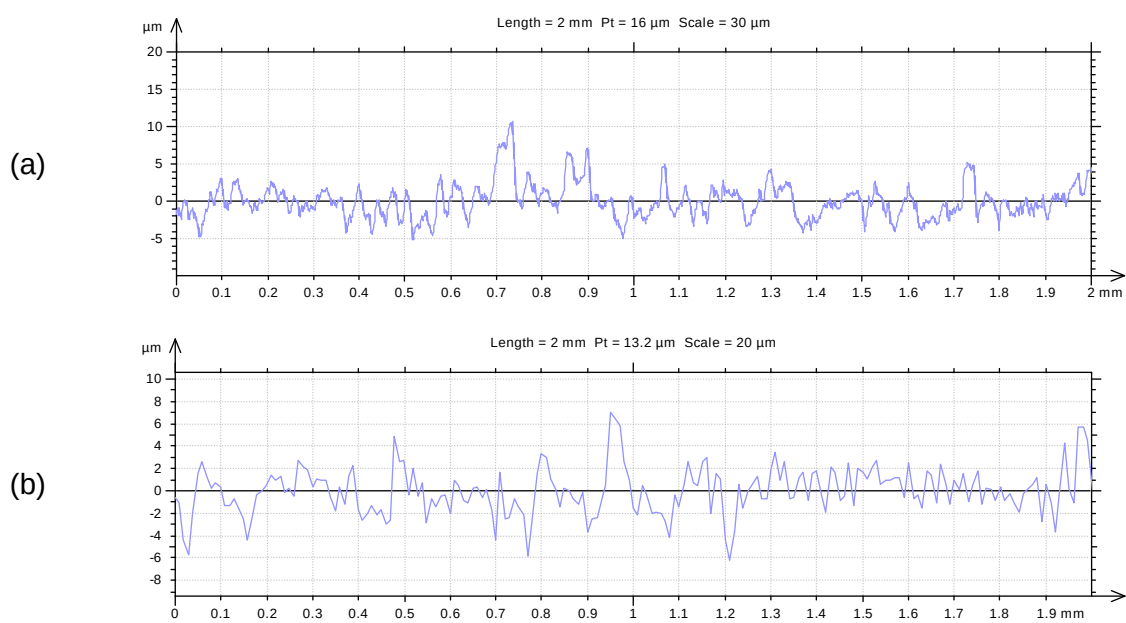


Figura 5.54 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul

Os parâmetros de rugosidade estão na Tabela 5.25 para DA1, com base nas análises feitas nas Figs. 5.53 e 5.54. Tem-se na amostra DA1 a presença de picos isolados, o que é notado visivelmente na topografia, com um relevo pronunciado, e também identificado através da variação elevada entre os valores do parâmetro St (Fig. 5.53 c e Tab. 5.35).

Tabela 5.25 – Valores de rugosidade para amostra DA1 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A _{Erod}	1,850	2,450	42,800	0,482	8,200	5.53

O aspecto topográfico da amostra DA2 é apresentado na Fig. 5.55. Na Figura 5.56, é mostrado o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DA2.

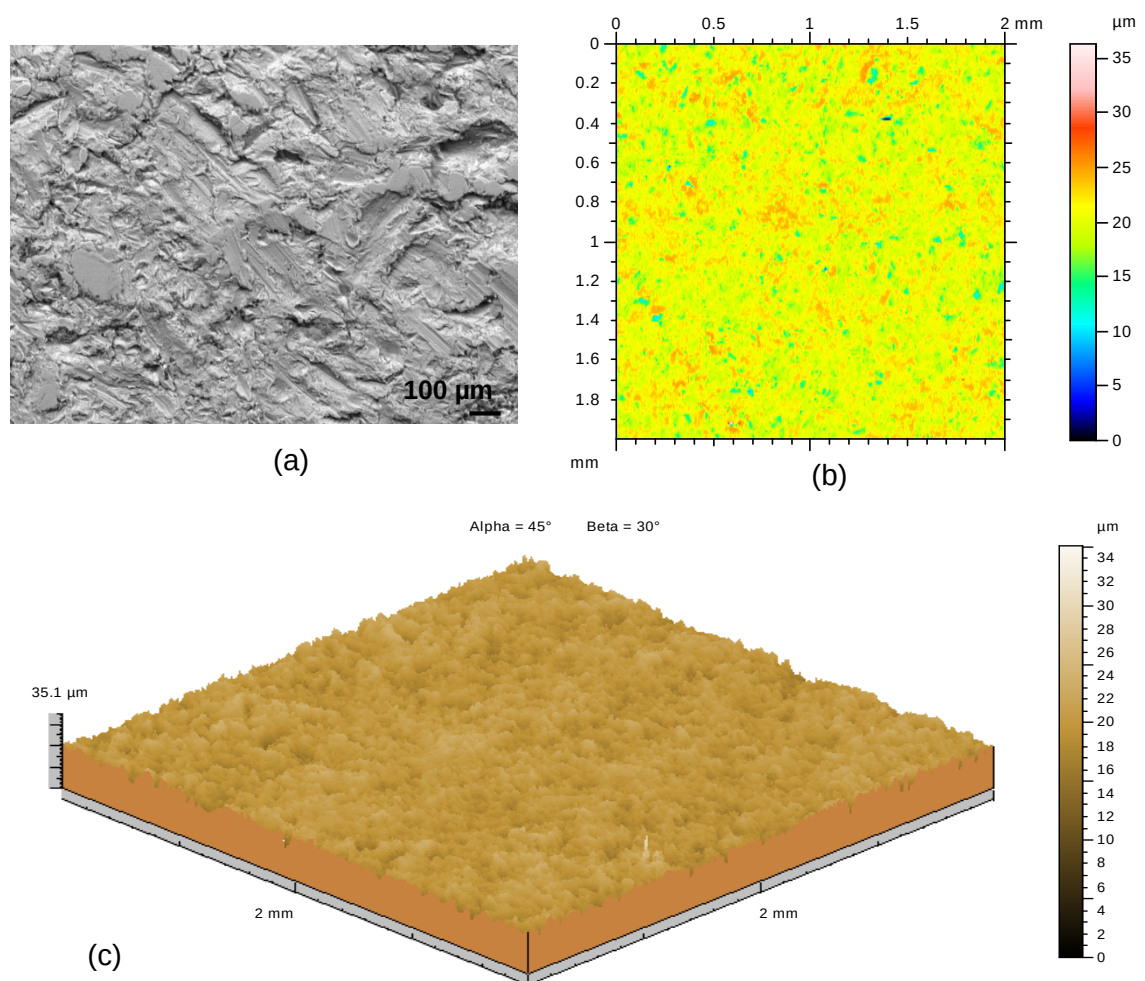


Figura 5.55 – Topografia DA2 (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

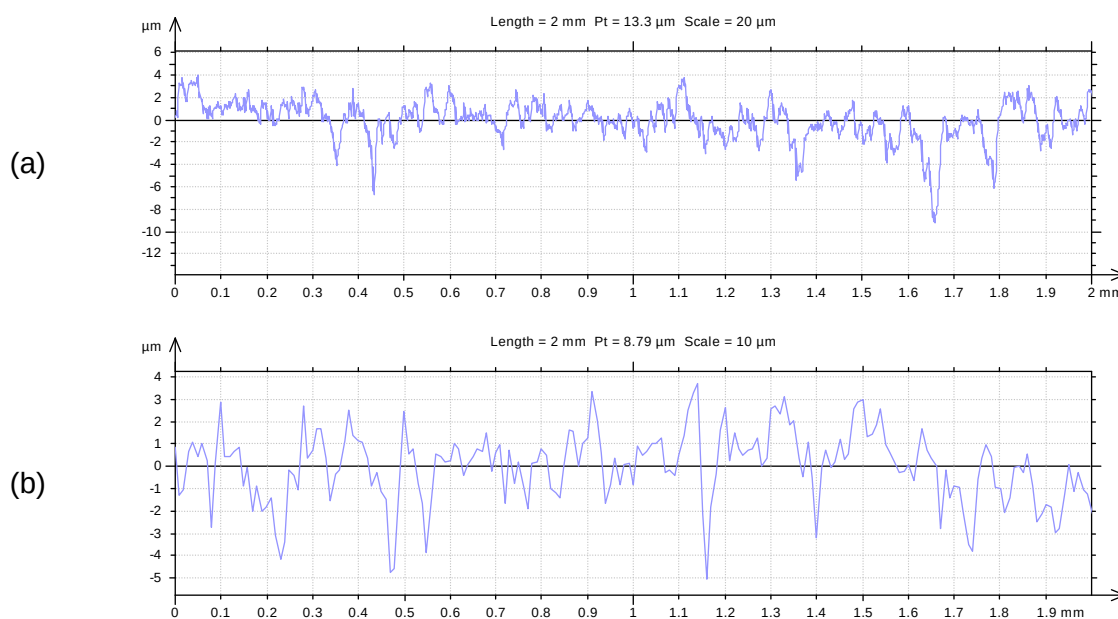


Figura 5.56 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DA2

A Tabela 5.26 apresenta os parâmetros de rugosidade para as superfícies analisadas, na região da área erodida e perfil leste oeste e norte sul. No teste DA2, existem picos isolados, apesar de menor amplitude e frequência. Isto novamente refletiu no valor de St e da Tab. 5.26. Notam-se na topografia da Fig. 5.55 (c) regiões com vales profundos e pronunciados e picos isolados de amplitude elevada, porém com pequena área.

Tabela 5.26 – Valores de rugosidade para amostra DA2 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A_{Erod}	1,440	1,880	36,30	-0,767	5,470	5.55

Para o teste DA3, o resultado está apresentado na Fig. 5.57, em termos de aspecto topográfico. A Figura 5.58 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DA3.

A Tabela 5.27 exibe os parâmetros de rugosidade para a amostra DA3. Os testes DA2 e DA3 possuem valores relativamente próximos de Sa e Sq , conforme Tab. 5.36 e 5.37, na avaliação da área erodida. Como as duas amostras possuem um valor de desgaste próximo, é um bom indicativo da similaridade no comportamento dos resultados de perda de massa e rugosidade superficial.

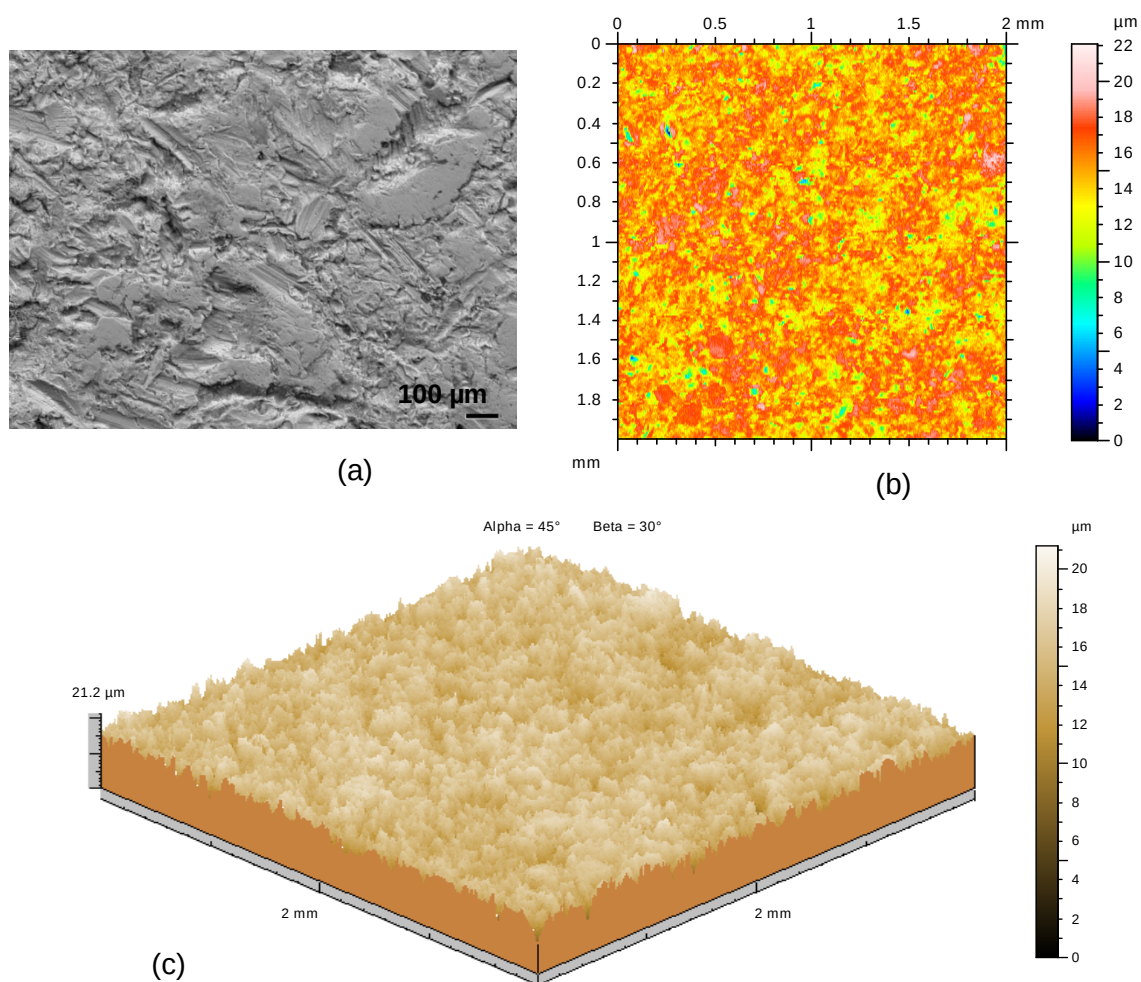


Figura 5.57 - Topografia DA3, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

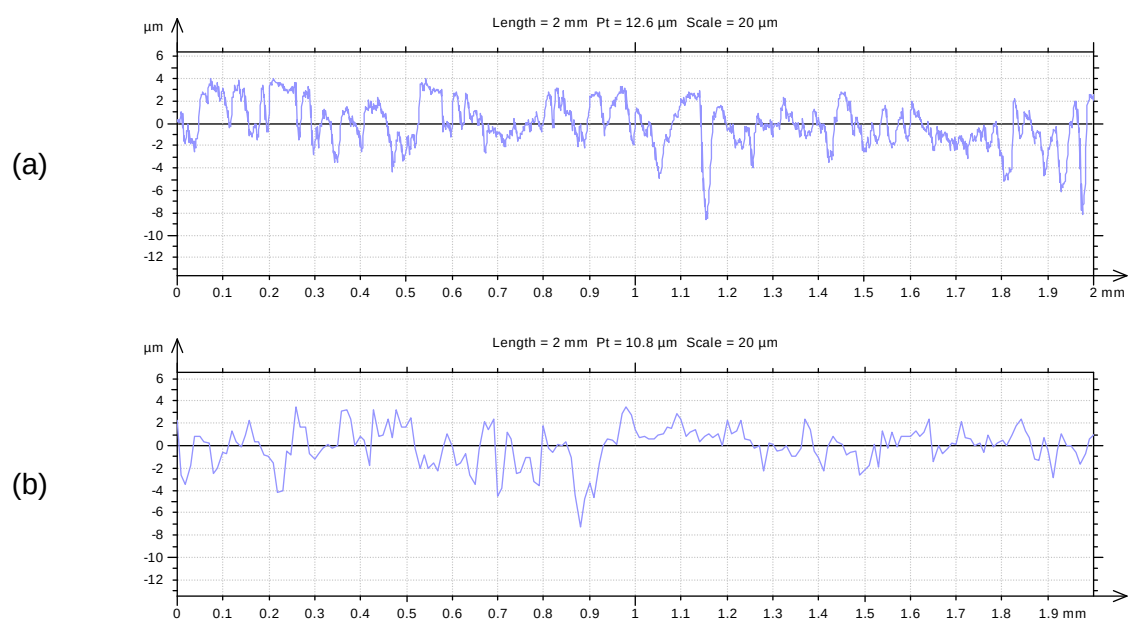


Figura 5.58 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DA3

Tabela 5.27 – Valores de rugosidade para amostra DA3 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A _{Erod}	1,470	1,890	22,100	-0,663	4,270	5.57

O ensaio DA4 tem o seu resultado apresentado na Fig. 5.59, em termos de aspecto topográfico.

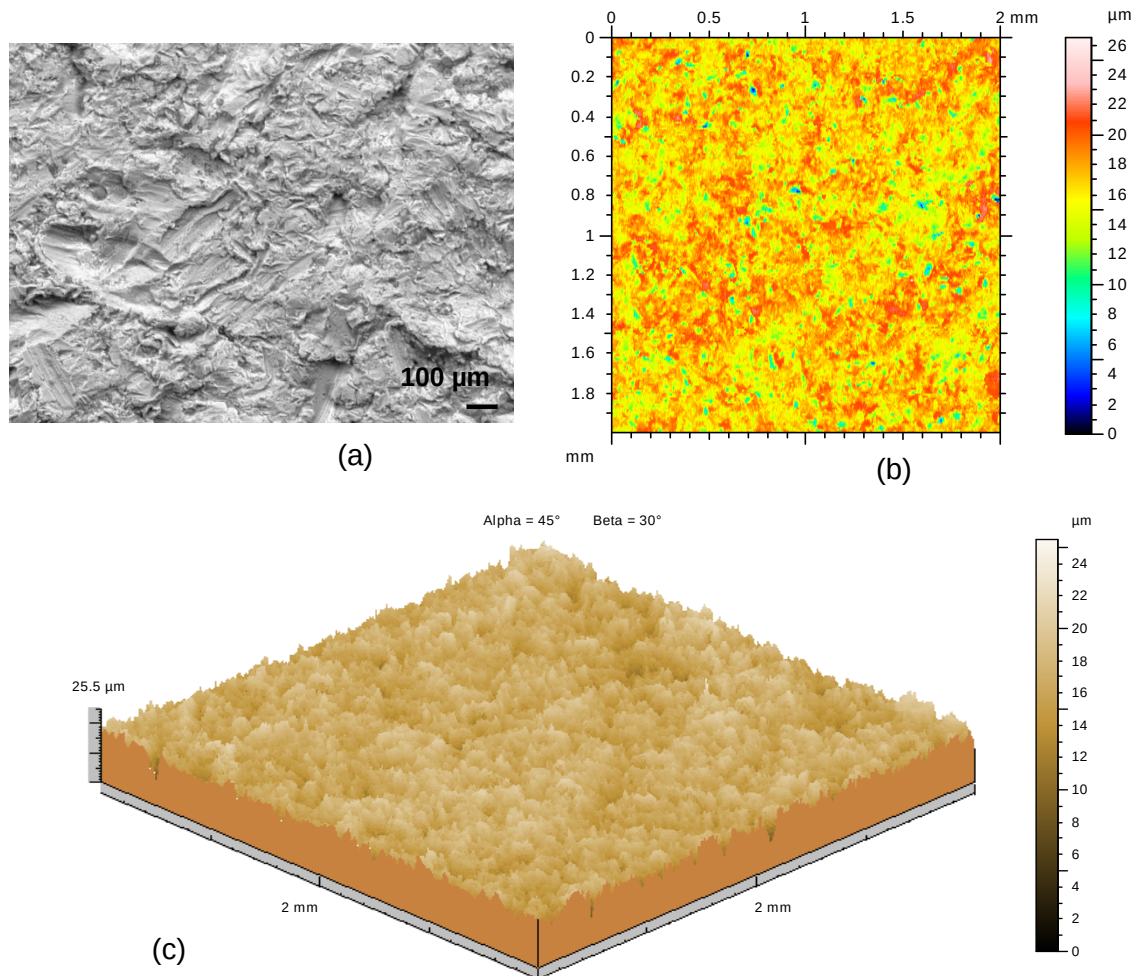


Figura 5.59 – Topografia DA4, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

A Figura 5.60 expõe o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DA4. A Tabela 5.28 exprime os parâmetros de rugosidade para a amostra DA4.

A relação entre a taxa de erosão e os parâmetros de rugosidade para o processo MIG/MAG duplo arame paralelo está na Fig. 5.61, considerando os resultados da avaliação para a área total por ser um parâmetro com maior precisão.

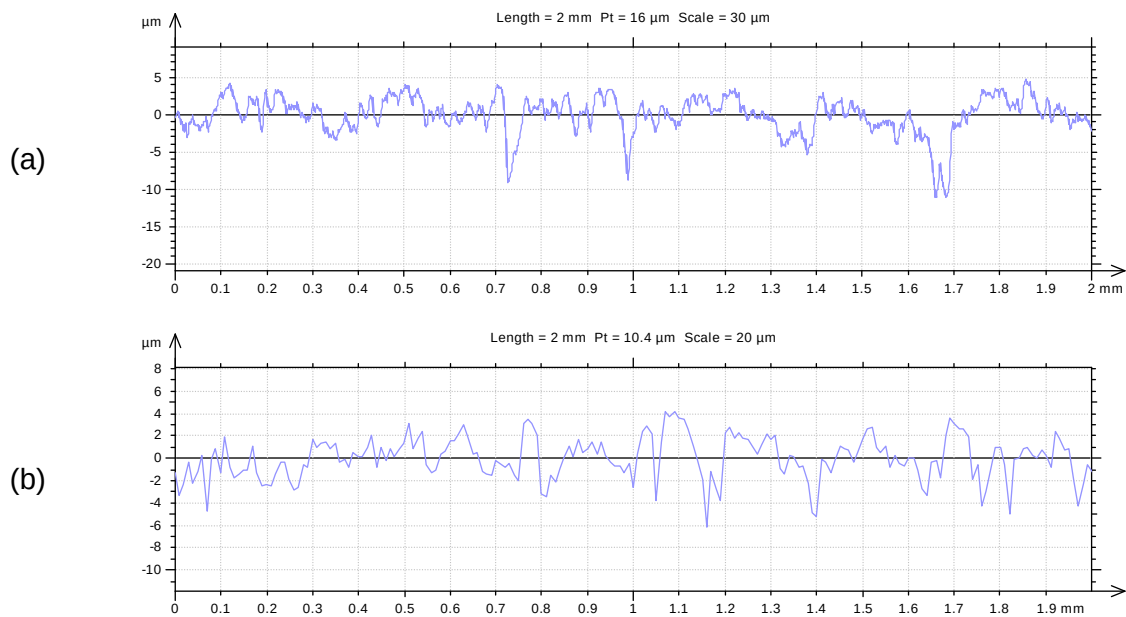


Figura 5.60 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DA4

Tabela 5.28 – Valores de rugosidade para amostra DA4 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A _{Erod}	1,660	2,170	26,500	-0,760	4,940	5.59

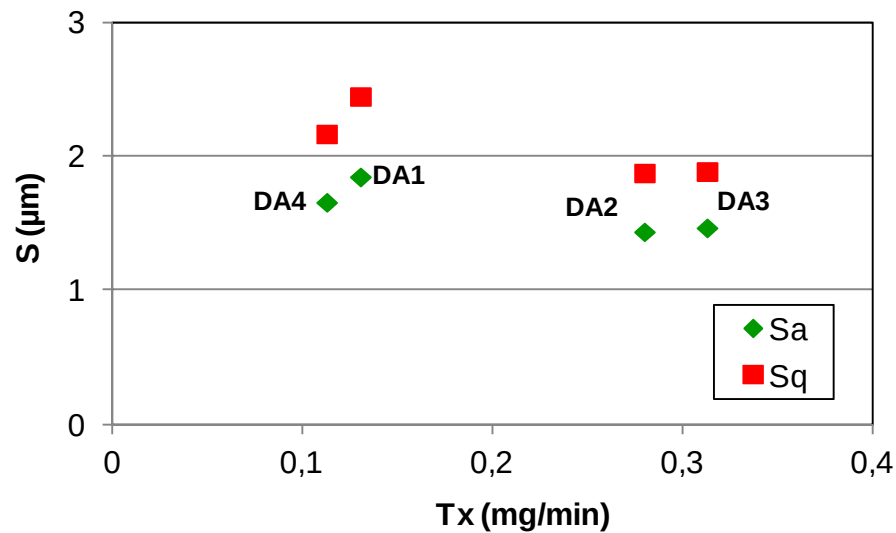


Figura 5.61 – Evolução da taxa de erosão com o parâmetro Sa, desvio aritmético médio do perfil e Sq, desvio médio quadrático

Os valores de taxa de erosão são similares para o conjunto de ensaios DA1/DA4 e DA2/DA3, sendo que o desvio aritmético médio e o desvio médio quadrático (Sa e Sq) estão

próximos somente no caso de DA2 e DA3. As amostras DA1 e DA4 com taxa de erosão similar possuem ainda sim valores aproximados para Sa e Sq.

A amostra DA1 tem o maior valor para a altura total do perfil (parâmetro St). Os parâmetros Ssk (fator de assimetria) e Sku (fator de achatamento) com valor elevado indicam a presença de picos ou vales isolados. Chama a atenção o fato da assimetria de DA1 ser positiva (Ssk e Rsk) e dos demais testes negativa. Na Fig. 5.53 (c), a presença de uma área com relevo pronunciado reforça a tese de que possam existir regiões específicas com elevada resistência capazes de suportar a impactos sucessivos das partículas, reduzindo a taxa de erosão e a perda de massa acumulada.

5.4.3. Amostras do processo MIG/MAG duplo arame série

Para as amostras soldadas pelo processo MIG/MAG duplo arame série em aço inoxidável, os resultados em termos de topografia são apresentados a seguir, englobando as amostras DS1 e DS2.

A Figura 5.62 apresenta o aspecto topográfico da amostra DS1. Na Figura 5.63 têm-se os valores de rugosidade para a região central da amostra na direção leste oeste e norte sul e na Tab. 5.29, os valores dos parâmetros de rugosidade.

Tabela 5.29 – Valores de rugosidade para amostra DS1 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa / Ra	Sq / Rq	St / Rt	Ssk / Rsk	Sku / Rku	Figura
A _{Erod}	1,740	2,230	25,500	-0,434	3,720	5.62

Vale a ressalva de que esta amostra apresentou um elevado desgaste, provavelmente devido à presença de fortes traços de metal de base no revestimento. Apesar de um maior valor de taxa de erosão e perda de massa acumulada, a amostra DS1 possui os valores dos parâmetros de rugosidade muito próximos ao das demais amostras em MIG/MAG duplo arame paralelo. Isso é um indicativo de que a superfície erodida tem uma característica comum nestes ensaios, principalmente naqueles que apresentam uma mesma faixa de dureza.

O valor negativo de Ssk na Tab. 5.29 indica que as amplitudes de maior frequência possuem valores menores que a média, ou seja, indica um perfil do tipo platô. O valor de Sku é próximo do valor 3 (três) apontando a centralização da distribuição, isto é, o tamanho dos diversos picos ou vales apresentam valores próximos da média. Se a distribuição das alturas segue uma distribuição normal, o valor do grau de achatamento é igual a 3 e o coeficiente de assimetria é igual a zero.

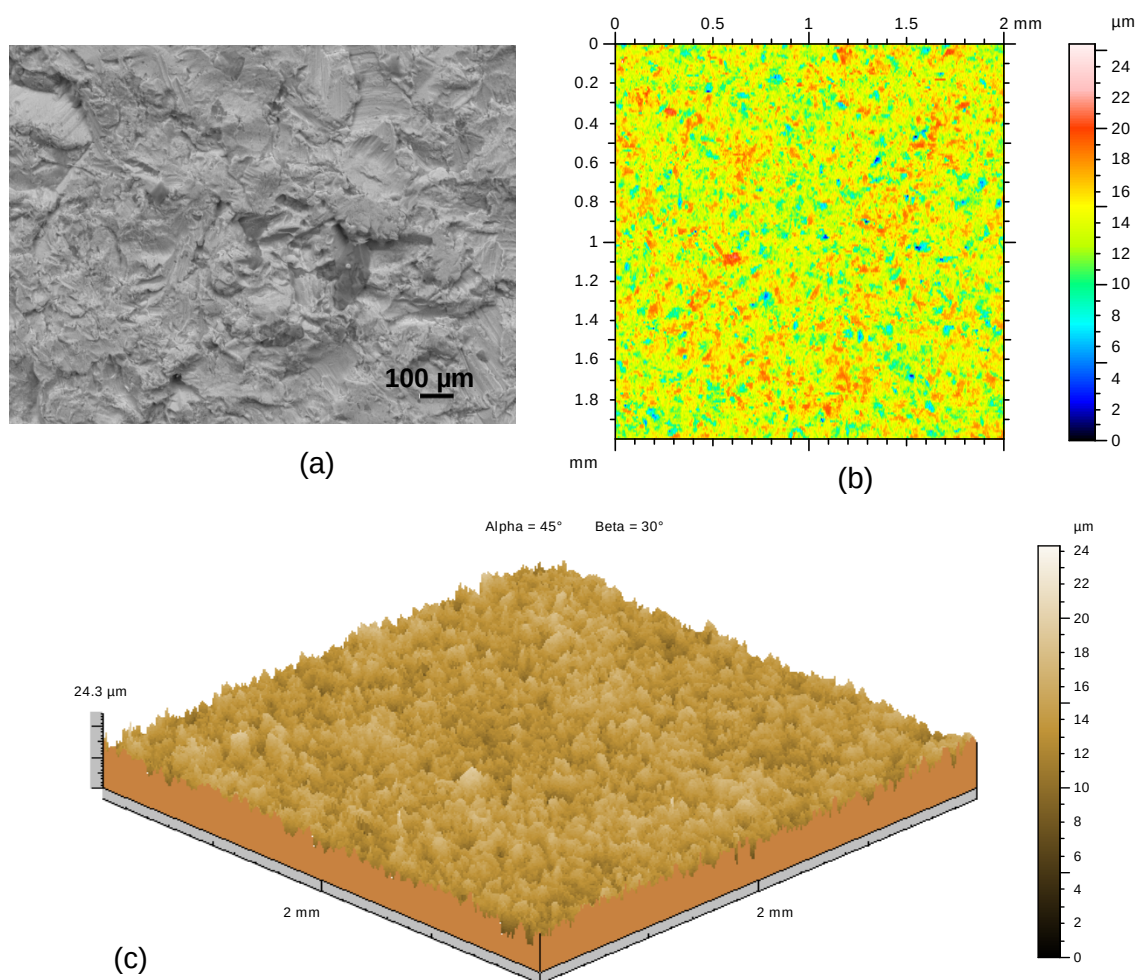


Figura 5.62 – Topografia DS1, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

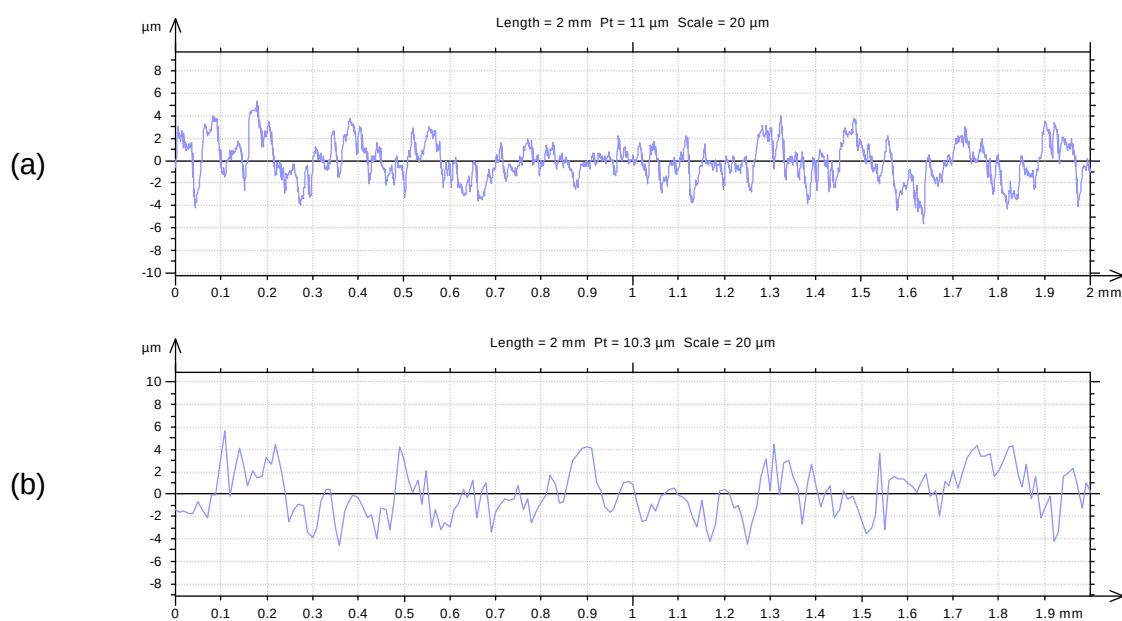


Figura 5.63 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DS1

A Figura 5.64 apresenta o aspecto topográfico da amostra DS2 e a Fig. 5.65 a rugosidade na região central desta amostra.

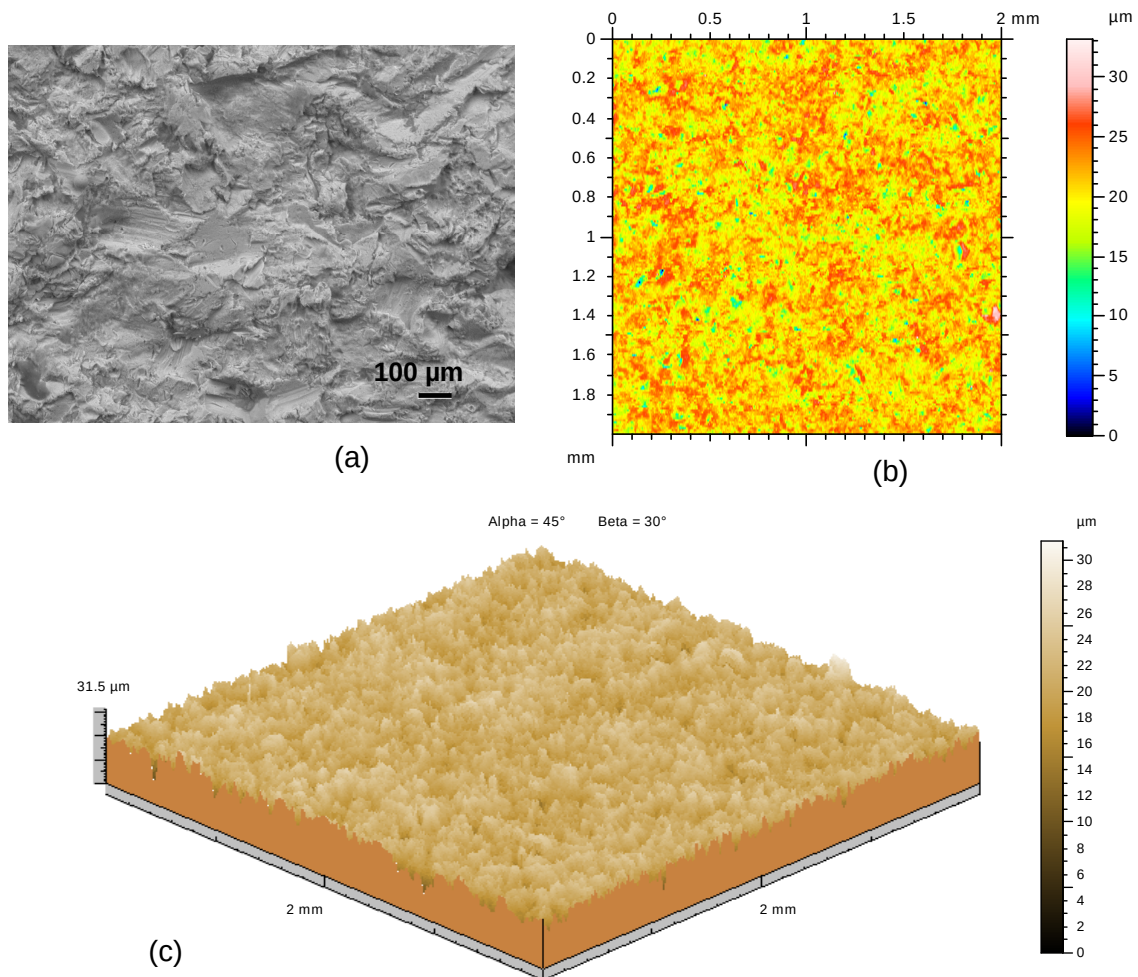


Figura 5.64 – Topografia DS2, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

Na Tabela 5.30, são apresentados os parâmetros de rugosidade para o teste DS2. Nota-se uma menor dispersão entre os valores de S_a e S_q com um valor elevado para S_t e S_{ku} indicando a presença de picos e vales isolados.

Tabela 5.30 – Valores de rugosidade para amostra DS2 erodida, parâmetros em μm

Local	S_a	S_q	S_t	S_{sk}	S_{ku}	Figura
A_{Erod}	2,010	2,590	33,100	-0,501	4,180	5.64

Apesar de uma menor taxa de erosão, de forma geral os valores dos parâmetros de rugosidade de DS2 são maiores do que DS1. Nota-se também uma assimetria negativa (S_{sk}) e um coeficiente de curtose superior a 3, indicando uma centralização da distribuição.

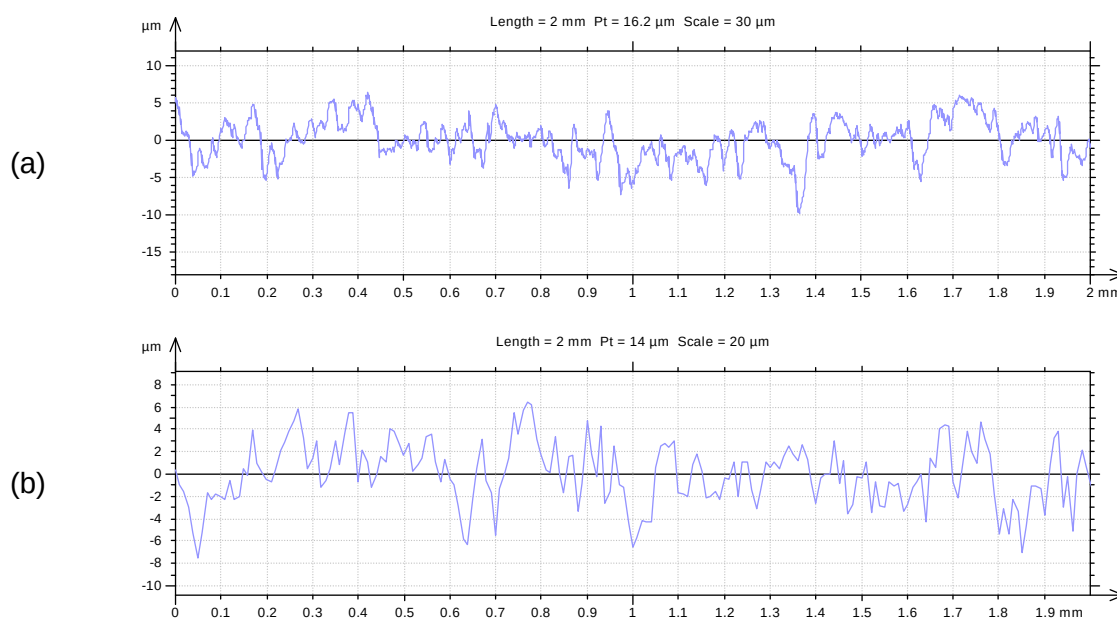


Figura 5.65 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DS2

5.4.4. Análise final da topografia

Os valores dos parâmetros de rugosidade são apresentados neste tópico de forma conjunta, buscando o melhor entendimento sobre o comportamento das amostras durante os ensaios de erosão.

A medição do S_a (média aritmética do desvio do perfil em relação à linha de centro) e do S_q (média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil em relação à linha média central) é utilizada para caracterizar a rugosidade e a presença de possíveis descontinuidades na superfície. A Figura 5.66 apresenta os resultados dos parâmetros S_a e S_q .

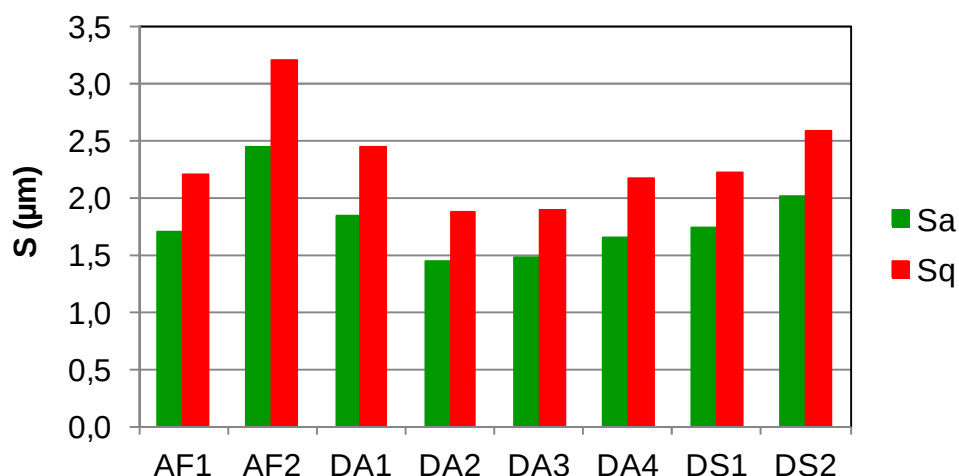


Figura 5.66 – Desvio aritmético médio (S_a) e quadrático (S_q) do perfil

Para o processo MIG/MAG duplo arame paralelo e série, os corpos de prova com tendências similares de taxa de erosão possuem uma rugosidade superficial com valores próximos, como é o caso de DA2 e DA3. Os corpos de prova com menores taxas de erosão tiveram tendência em reduzir a rugosidade (AF1, DA2 e DA3), comparando os seus resultados para um mesmo processo de soldagem.

Para o corpo de prova em MIG/MAG arame frio, AF1 tem o menor desgaste, com baixo S_a e S_q , enquanto AF2 com a maior taxa de erosão apresenta valores superiores. Outro fato notável é que de forma geral a rugosidade para o MIG/MAG arame frio na Fig. 5.66 é superior aos valores encontrados no MIG/MAG duplo arame.

A Figura 5.67 apresenta a altura total do perfil (St), com uma grande variação, influenciado principalmente pela presença de alguns picos isolados nas amostras como, por exemplo, em AF2 e DA1.

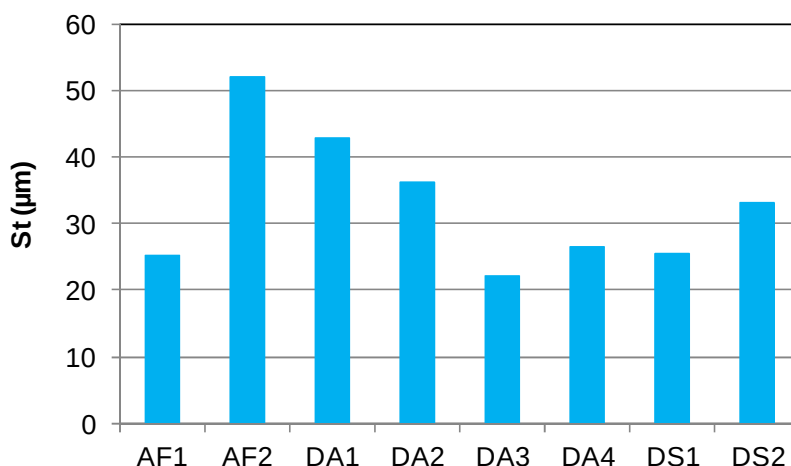


Figura 5.67 - Evolução do parâmetro St altura total

Percebe-se que os picos e vales têm uma amplitude maior na direção leste oeste em relação a norte sul. A exceção é DS1 com valores iguais em ambas as direções. Esta é uma evidência de que as partículas tendem a gerar sucros mais profundos e pontiagudos na direção leste oeste, provavelmente devido ao perfil de incidência e escorregamento em uma direção preferencial durante o giro do porta amostras.

Para uma melhor caracterização dos perfis, propõe-se avaliar os parâmetros estatísticos, neste caso, o coeficiente de assimetria S_{sk} e de curtose S_{ku} , capazes de descrever a morfologia e distribuição das alturas na superfície com relação à presença de picos ou vales.

A Figura 5.68 apresenta o coeficiente de assimetria S_{sk} para todas as amostras. Lembrando que o coeficiente S_{sk} é uma medida da assimetria da curva de distribuição das amplitudes de um perfil. Se negativo, como no caso da maioria das amostras da Fig. 5.69, as amplitudes de maior frequência possuem valores menores que a média, indicando um perfil do tipo platô. Se positivo, como na amostra DA1, as amplitudes de maior frequência possuem valores maiores que a média, caracterizando um perfil com presença de picos com baixa densidade de material. No caso de DA1, o pico foi perceptível na avaliação por interferometria a laser (ver Fig. 5.53).

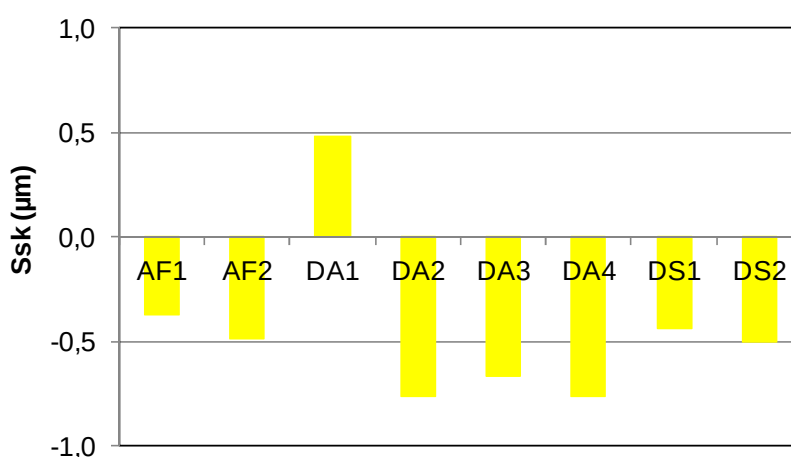


Figura 5.68 – Evolução do parâmetro S_{sk} , fator de assimetria

A Figura 5.69 apresenta o coeficiente de curtose S_{ku} para as amostras erodidas. O coeficiente de curtose (S_{ku}) é uma medida do grau de achatamento da função densidade de probabilidade das alturas. Um $S_{ku} < 3$ caracteriza um achatamento da distribuição, isto é, diferentes picos ou vales ocorreram numa frequência similar. Se $S_{ku} > 3$, ocorre uma centralização da distribuição, isto é, o tamanho dos diversos picos ou vales apresentam valores próximos da média. No caso dos ensaios, todos os valores de S_{ku} são maiores do que 3.

No ensaio DA1, o valor muito elevado de S_{sk} é um reflexo da presença de picos de grande amplitude. O ensaio DS1 apresentou o menor valor de S_{ku} muito próximo ao valor 3.

Se a distribuição das alturas segue uma distribuição normal, o valor do grau de achatamento é igual a 3 e o coeficiente de assimetria, igual a zero. A Figura 5.70 apresenta os resultados de S_{ku} e S_{sk} para os ensaios de erosão.

O teste DS1 novamente está posicionado na condição mais próxima de uma distribuição normal. De forma geral, apenas a amostra DA1 apresentou um aspecto diferenciado, reflexo da variação nos parâmetros S_t , S_{sk} e S_{ku} .

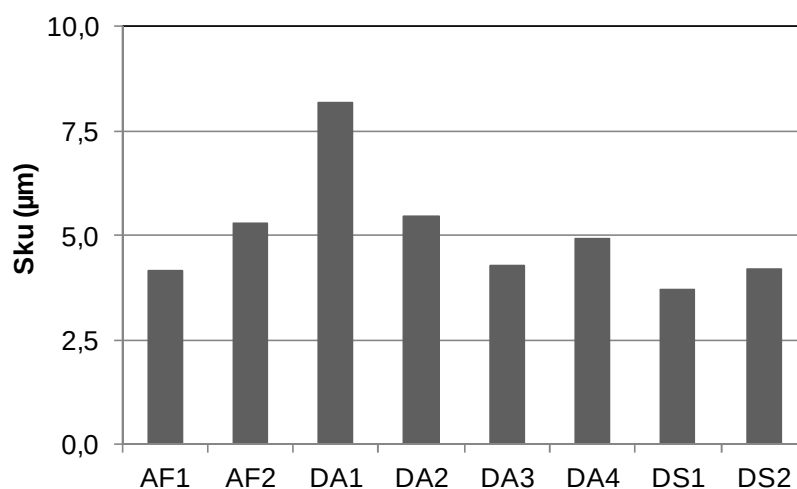


Figura 5.69 – Evolução do parâmetro Sku, fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)

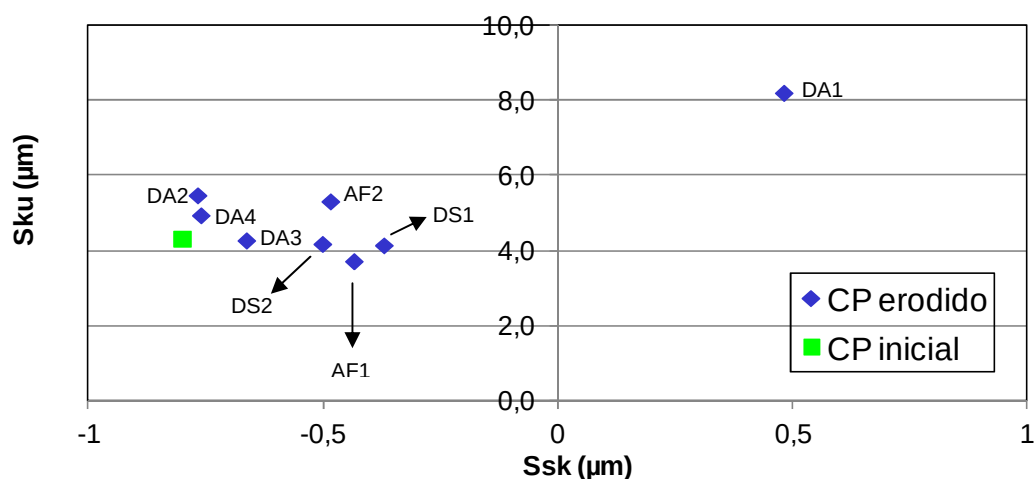


Figura 5.70 – Evolução do parâmetro Sku fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis) e Ssk fator de assimetria

Avaliando linearmente a direção leste oeste e norte sul para o teste DA1, o valor de Ssk obtido também é positivo, como pode ser visto na Tab. 5.35. Isto mostra a presença de picos de grande amplitude com baixa densidade de material em várias regiões da amostra. Uma das possibilidades é de que tenha ocorrido o deslocamento de material para cima da linha média, sugerindo uma intensa e progressiva deformação plástica, sem a ocorrência de uma grande perda de massa. Estes fatos podem estar relacionados com o baixo valor da taxa de erosão e perda de massa acumulada para a amostra DA1.

Talvez a diluição menor deste ensaio tenha formado regiões mais resistentes à deformação durante o desgaste, originando picos isolados com baixa densidade de material e afetando o seu perfil de desgaste. Vale a ressalva de que os valores de Sa e Sq deste material são levemente superiores ao das demais amostras.

No geral, nota-se que as amostras DA2 e DA3 que apresentaram as maiores taxas de erosão para o processo MIG/MAG duplo arame paralelo, têm valores menores e idênticos de S_a e S_q (Fig. 5.66).

Na Figura 5.68, as amostras DA2 e DA3, com valores de S_{sk} negativo indicam a presença de um perfil do tipo platô, proporcionado provavelmente pela elevada perda de massa. Vale lembrar que no teste DA2 e DA3 a perda de massa ocorreu de forma intensa durante os primeiros 20 minutos. Com uma alta deformação plástica da superfície, comprovada pelo elevado valor de dureza, ocorreu uma tendência de redução da perda de massa no encerramento do ensaio.

No caso da amostra DA4, com valores similares de S_{sk} e S_{ku} aos encontrados para a DA2 e DA3, não ocorreu esta perda intensa de material no início e sim uma taxa de erosão estável ao longo de todo o ensaio. Novamente, supõe-se que da mesma forma que os valores de dureza são similares para todas as superfícies erodidas, provavelmente os parâmetros de rugosidade alcançaram valores relativamente idênticos em um mesmo processo de soldagem.

Fica evidente a necessidade de estudar com maior profundidade o uso de aço inoxidável austenítico e suas características superficiais em relação ao desgaste por erosão pura.

O fato da Fig. 5.70 não apresentar uma relação clara de comportamento dos corpos de prova em relação ao espaço morfológico corroboram a existência de fatores não controlados ou identificados atuando nos resultados.

A grande severidade do ensaio de erosão pura e os parâmetros similares de rugosidade demonstraram que, em 2 horas, o estágio alcançado provavelmente seja de atenuação em todos os testes. Por isso, uma análise de perda de massa, rugosidade e dureza em menores intervalos de tempo durante a erosão pura talvez possa ajudar a entender melhor o fenômeno, sendo esta uma proposta para trabalhos futuros.

5.5. Testes de cavitação

Neste item, são apresentados e discutidos os resultados de erosão cavitacional nas amostras AF1, AF2, DA4, DS1 e DS2. O critério para a seleção de DA4 para a cavitação entre as amostras soldadas pelo processo MIG/MAG duplo arame paralelo foi o melhor desempenho em termos de taxa de erosão e perda de massa acumulada durante a erosão pura. Foram utilizados dois métodos de avaliação cavitacional das amostras testadas, quais sejam: o gravimétrico e a medição da profundidade média de desgaste por interferometria.

Por isso, as amostras ao final dos ensaios foram analisadas em MEV e interferometria a laser, para verificar as características topográficas da região desgastada. Determinaram-se os parâmetros de rugosidade e imagens das superfícies erodidas.

5.5.1. Desempenho durante a cavitação

A amostra AF1 foi submetida ao ensaio de cavitação durante um período de 20 horas com a determinação horária da perda de massa. A taxa de erosão e a perda de massa acumulada estão apresentadas na Tab. B.10 do Apêndice B, Fig. 5.71 e 5.72.

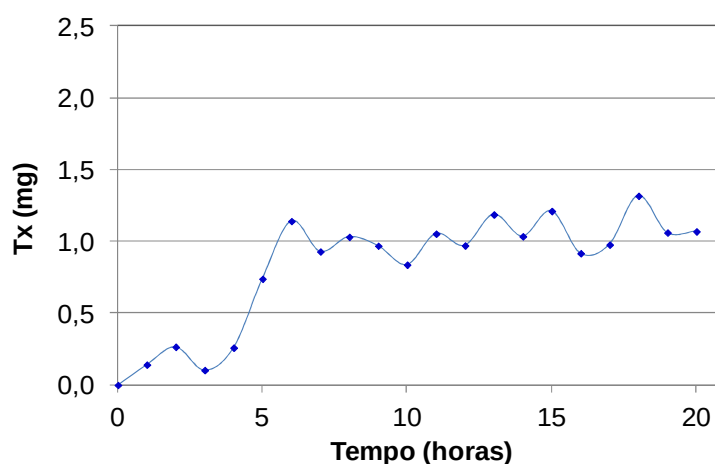


Figura 5.71 – Taxa de cavitação da amostra AF1

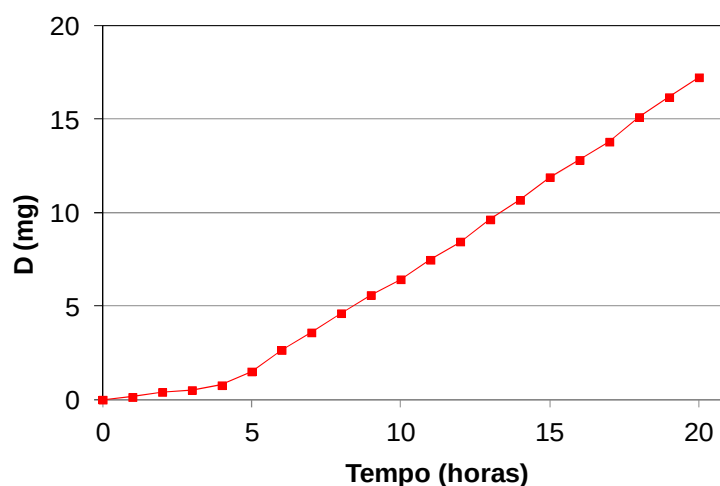


Figura 5.72 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra AF1

De acordo com a Fig. 5.71, provavelmente a incubação foi superada a partir da 2ª hora, passando pela acumulação durante o período da 2ª à 8ª hora, com regime estacionário da 9ª a 20ª hora.

Na Figura 5.73, a taxa de cavitação foi de 1,083 mg/h para o intervalo da 10^a à 20^a hora com uma correlação superior à 99%, indicando uma evolução muito linear ao fim do ensaio.

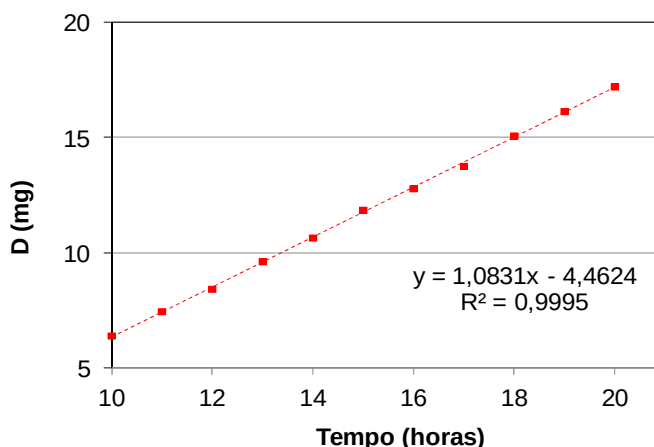


Figura 5.73 – Taxa de cavitação para a amostra AF1 entre 10 e 20 horas

A Tabela B.11 traz a perda de massa para a amostra AF2. O desempenho à cavitação é apresentado na Fig. 5.74 e 5.75, respectivamente para a taxa de erosão e perda de massa acumulada. Observa-se, de forma geral, que o resultado de AF2 é muito próximo à AF1 para o ensaio de cavitação. Ambos os ensaios atingiram uma perda de massa acumulada em torno de 17 g. Esse resultado é um bom indicativo da repetibilidade dos testes, tendo em vista uma soldabilidade idêntica dos testes AF1 e AF2 com diluição em torno de 13%.

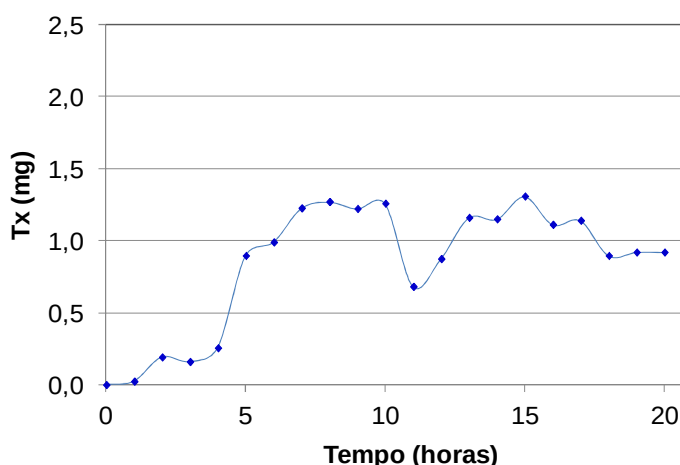


Figura 5.74 – Taxa de cavitação da amostra AF2

Vale lembrar que na erosão pura ocorreu uma variação alta entre os resultados de AF1 e AF2, que agora não se repetiu na cavitação.

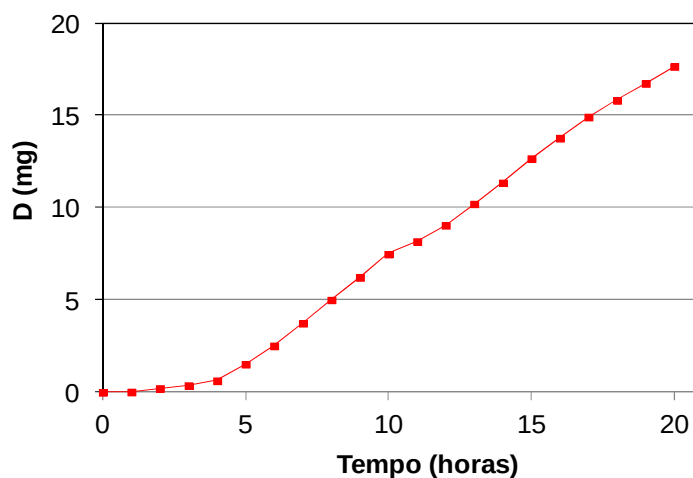


Figura 5.75 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra AF2

Com relação à taxa de cavitação, a Fig. 5.76 indica que o valor é de 1,065 mg/h para AF2 com uma correlação de 99%. O valor de AF2 levemente inferior à AF1 provavelmente foi influenciado pela baixa perda de massa nos intervalos de 11 e 12 horas.

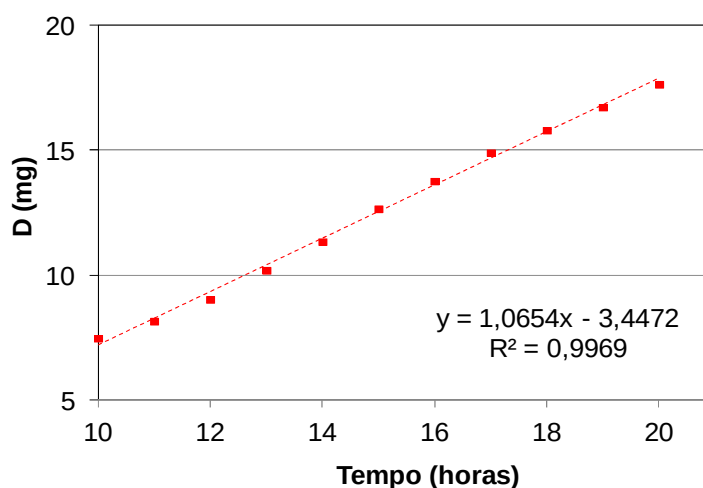


Figura 5.76 – Taxa de cavitação para a amostra erodida AF2 entre 10 e 20 horas

A partir deste ponto, serão avaliadas as amostras soldadas pelo processo MIG/MAG duplo arame. A amostra DA4 tem seu desempenho à cavitação apresentado na Tabela 5.43. As Figuras 5.77 e 5.78 representam a taxa de erosão e a perda de massa acumulada.

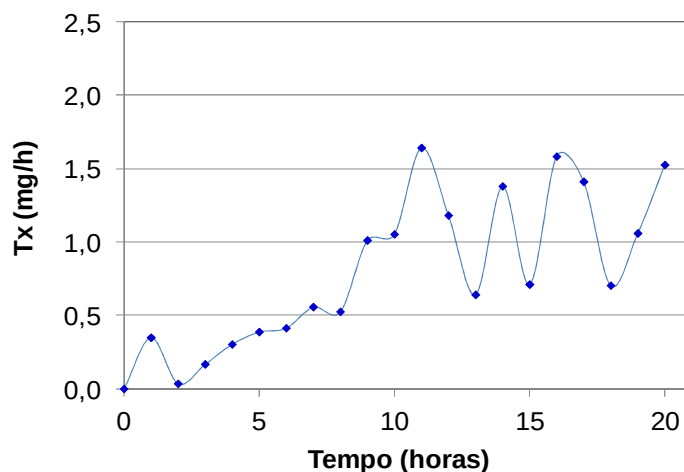


Figura 5.77 – Taxa de erosão por cavitação da amostra DA4

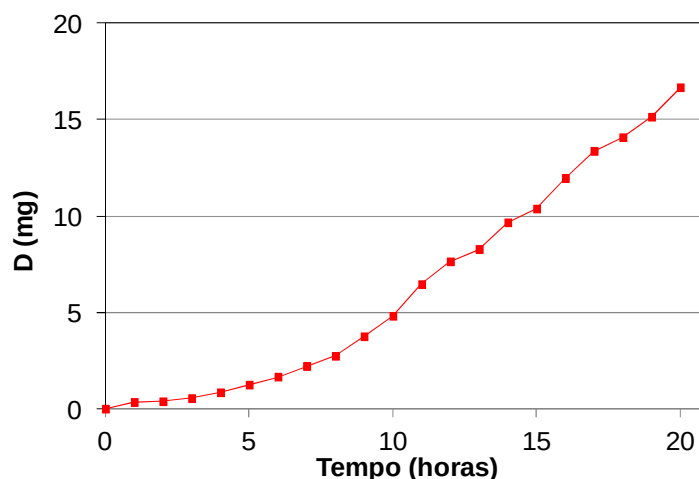


Figura 5.78 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra DA4

A perda de massa acumulada alcançou valores da ordem de 16 mg, muito próximos aos encontrados para o MIG/MAG arame frio. Ocorreu certa oscilação dos valores de perda de massa entre 11 e 20 horas, que não foram capazes de alterar os valores finais.

Na Figura 5.79, é apresentada a taxa de erosão para a amostra DA4, com um valor encontrado de 1,143 mg/h superior ao das amostras em MIG/MAG arame frio.

Neste caso, também fica claro que o resultado superior à erosão pura para o teste DA4 não se mostrou presente na cavitação. Vale lembrar que o ensaio DA4 foi o melhor desempenho entre os ensaios realizados em erosão pura para a soldagem com arame em aço inoxidável austenítico.

A Tabela B.13 traz a perda de massa na cavitação para a amostra DS1 em MIG/MAG duplo arame série. As Figuras 5.80 e 5.81 apresenta a evolução da taxa de cavitação e perda de massa acumulada.

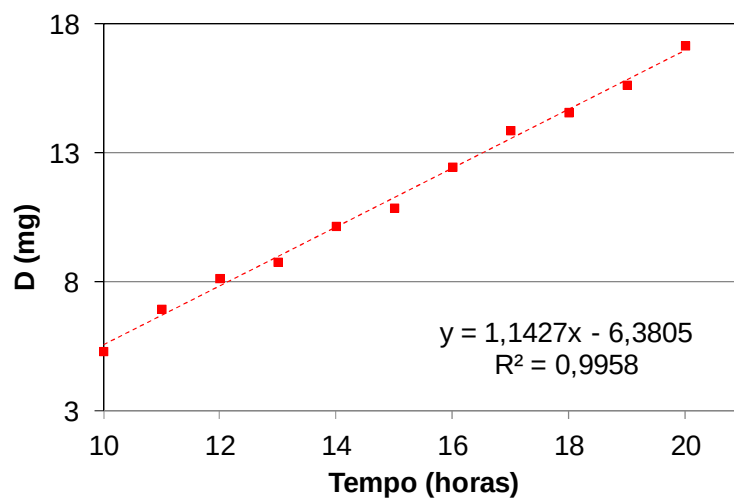


Figura 5.79 – Taxa de cavitação para a amostra DA4 entre 10 e 20 horas

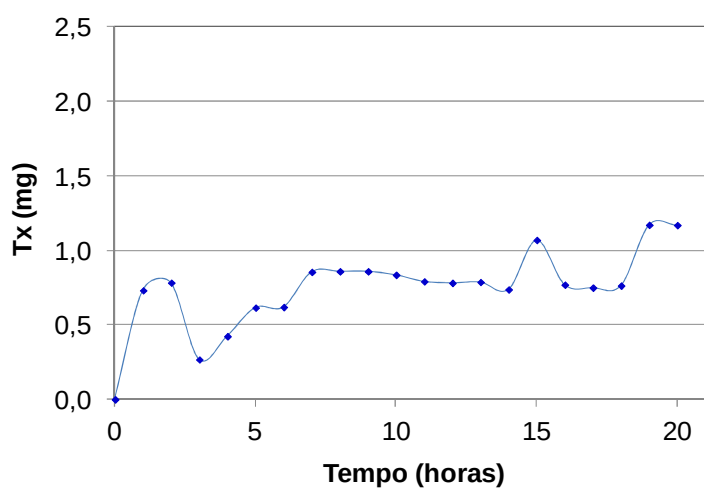


Figura 5.80 – Taxa de cavitação da amostra DS1

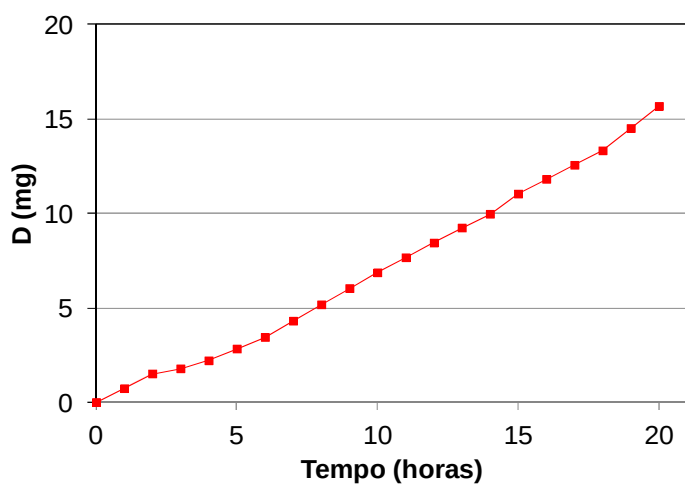


Figura 5.81 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra DS1

Neste ensaio, a fase de incubação provavelmente foi superada nas primeiras horas. A partir da 7ª hora, a amostra entrou em regime estacionário e a perda de massa acumulada manteve-se relativamente estável com taxa de erosão levemente inferior à 1 mg/h e perda de massa acumulada de 15,65 mg.

Apenas na 15ª, 19ª e 20ª hora foram ultrapassados os valores de 1 mg para a perda de massa da amostra DS1, indicando uma resistência superior quando comparado ao MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame paralelo.

Na Figura 5.82, tem-se uma taxa de erosão média de 0,859 mg/h com correlação de 99%.

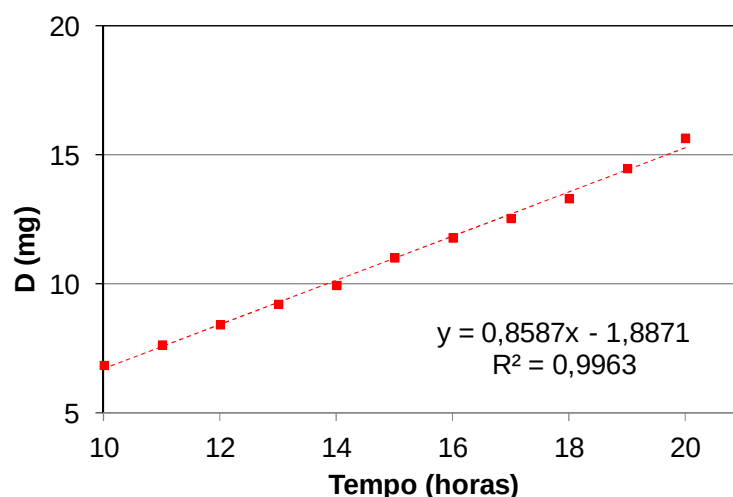


Figura 5.82 – Taxa de cavitação para a amostra DS1 entre 10 e 20 horas

A amostra DS2 tem os resultados em termos de cavitação, mostrados na Tab. B.9, Fig. 5.83 e 5.84. Nota-se no período acima de 10 horas a presença de vários pontos com taxa de erosão em torno de 1mg/h e a perda de massa acumulada total de 12,80 mg. Na Figura 5.85, tem-se uma taxa de erosão de 0,836 mg/h para DS2 inferior ao ensaio DS1.

Portanto, a amostra DS2 possui o melhor desempenho a cavitação para as amostras em aço inoxidável austenítico. Vale lembrar que, na erosão, DS2 apresentou desgaste superior às amostra DS1 e DA4.

A taxa de cavitação de todos os ensaios foi consolidada na Fig. 5.86. Nota-se, nas amostras AF1 e AF2, uma evolução muito próxima nas 5 horas iniciais e entre 12 e 17 horas de ensaios. A amostra DA4 tem uma grande oscilação de perda de massa nas 10 horas finais do ensaio.

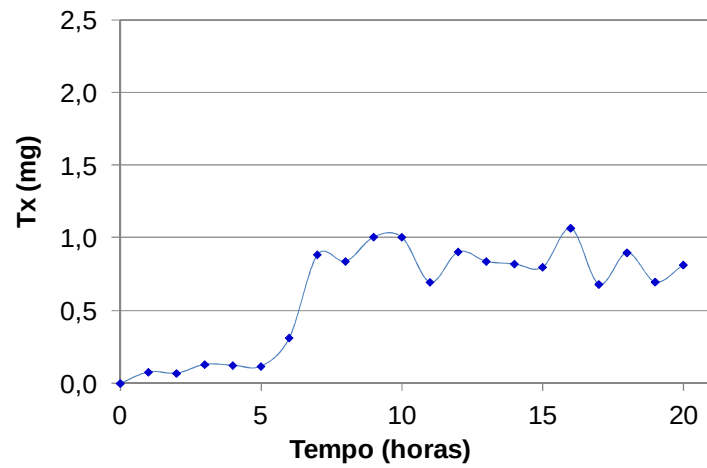


Figura 5.83 – Taxa de cavitação da amostra DS2

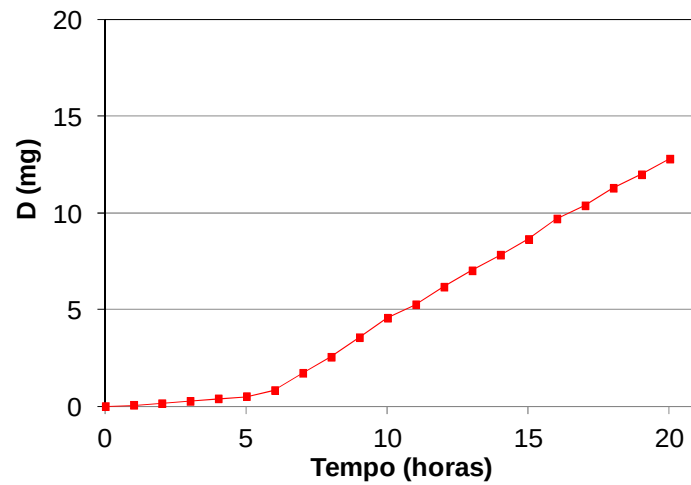


Figura 5.84 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra DS2

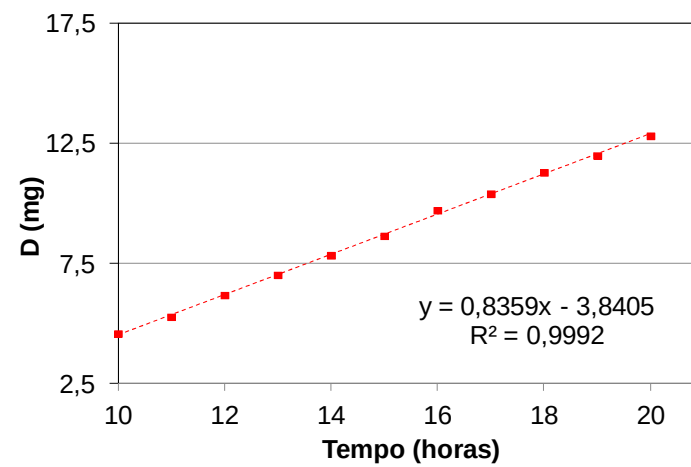


Figura 5.85 – Taxa de cavitação para a amostra DS2 entre 10 e 20 horas

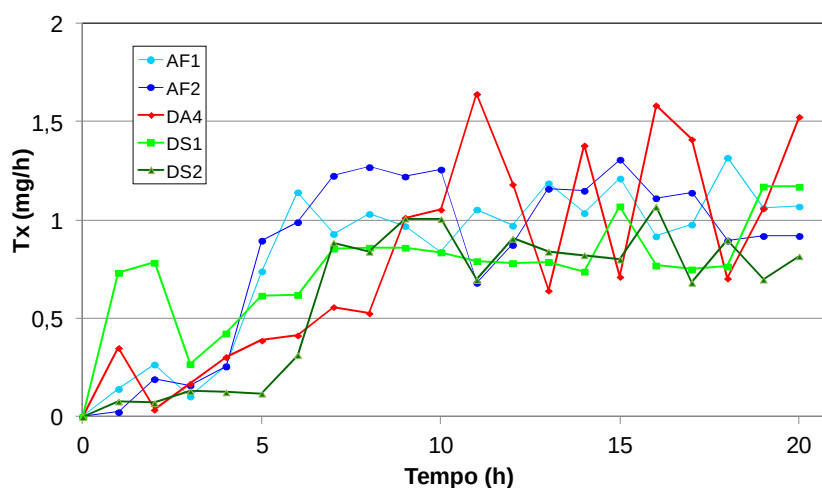


Figura 5.86 – Taxa de cavitação para as amostras em aço inoxidável austenítico

O ensaio DS2 destaca-se pela baixa taxa de erosão, com um comportamento de pouca perda de massa até às 5 horas de ensaio. A amostra DS1, que possui a segunda menor taxa de erosão, apresentou a maior perda de massa nas duas horas iniciais. Em seguida, a partir de 10 horas, DS1 e DS2 comportam-se de forma idêntica. Vale ressaltar que DS1 e DS2 possuem um ponto de máxima taxa de desgaste na 15ª e 16ª hora, respectivamente. De forma análoga, porém não sendo um ponto de máximo do ensaio de cavitação, o teste AF1 e AF2 também possuem um pico na 15ª hora.

A perda de massa acumulada total dos ensaios de cavitação soldados com arame eletrodo em aço inoxidável austenítico está apresentada na Fig. 5.87.

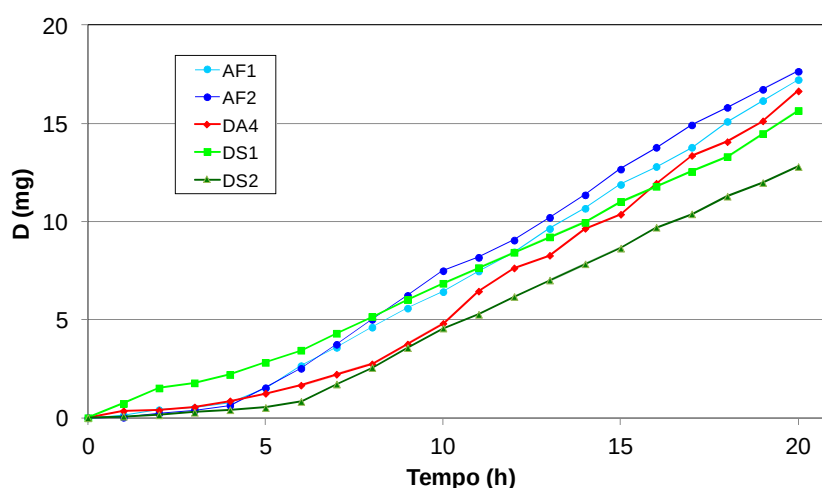


Figura 5.87 – Perda de massa acumulada para as amostras soldadas com uso de aço inoxidável austenítico

Nota-se que, para as 4 horas iniciais de ensaio, o desempenho é praticamente similar em todas as amostras. A exceção é o teste DS1, que apresentou uma elevada perda de massa logo no início do ensaio.

Na continuidade do ensaio para as amostras soldadas pelo mesmo processo, ou seja, MIG/MAG arame frio (AF1/AF2) e MIG/MAG duplo arame série (DS1/DS2), o desempenho sempre foi muito próximo até a 7ª hora. No restante do ensaio, começa a ocorrer uma distinção na resistência à cavitação.

Na cavitação, os resultados apresentaram a tendência de menor perda de massa para o processo MIG/MAG duplo arame série. No sentido inverso, o MIG/MAG arame frio tem um desempenho de alta perda de massa na cavitação, sendo um indicativo de que a dureza do substrato possa influenciar também na resistência do revestimento. Na posição intermediária, situa-se o MIG/MAG duplo arame paralelo, com uma resistência inferior ao MIG/MAG duplo arame série. Entretanto, como o teste DA4 possui uma elevação no desgaste a partir da 10ª hora, existe um aumento na sua taxa de erosão, sendo o valor superior ao processo MIG/MAG arame frio, apesar de sua menor perda de massa acumulada.

Vale destacar que, de forma análoga aos ensaios de erosão pura, o processo MIG/MAG arame frio possui baixa resistência ao desgaste por cavitação, considerando a perda de massa acumulada. Na direção contrária, processos com maior energia e/ou diluição apresentaram melhores desempenhos à cavitação. Tais resultados estão em consonância com os obtidos por Santa et al. (2011), estudando revestimentos soldados em aço inoxidável austenítico em diferentes processos de soldagem. De acordo com Santa et al. (2011), o material em aço inoxidável austenítico pode ser uma excelente alternativa para aplicações envolvendo alta diluição com o metal de base.

5.5.2. Análise das características topográficas das amostras cavitadas

A Figura 5.88 apresenta a característica superficial da amostra AF1 após o ensaio de cavitação. A Figura 5.89 mostra o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra AF1. O perfil da seção longitudinal cavitada é apresentado na Fig. 5.89 (c). A Tabela 5.31 mostra os parâmetros de rugosidade para a amostra AF1 cavitada.

Os valores de S_a e S_q na Tab. 5.31 apresentam relativo distanciamento, principalmente devido à existência de picos e vales pronunciados. Analisando o valor de S_t (Tab. 5.31), nota-se que houve grandes oscilações entre as amplitudes dos picos e vales. Provavelmente, os vales foram mais pronunciados, devido ao valor de S_v observado ser muito superior à S_p . O valor de S_{sk} negativo indica a existência de um perfil platô.

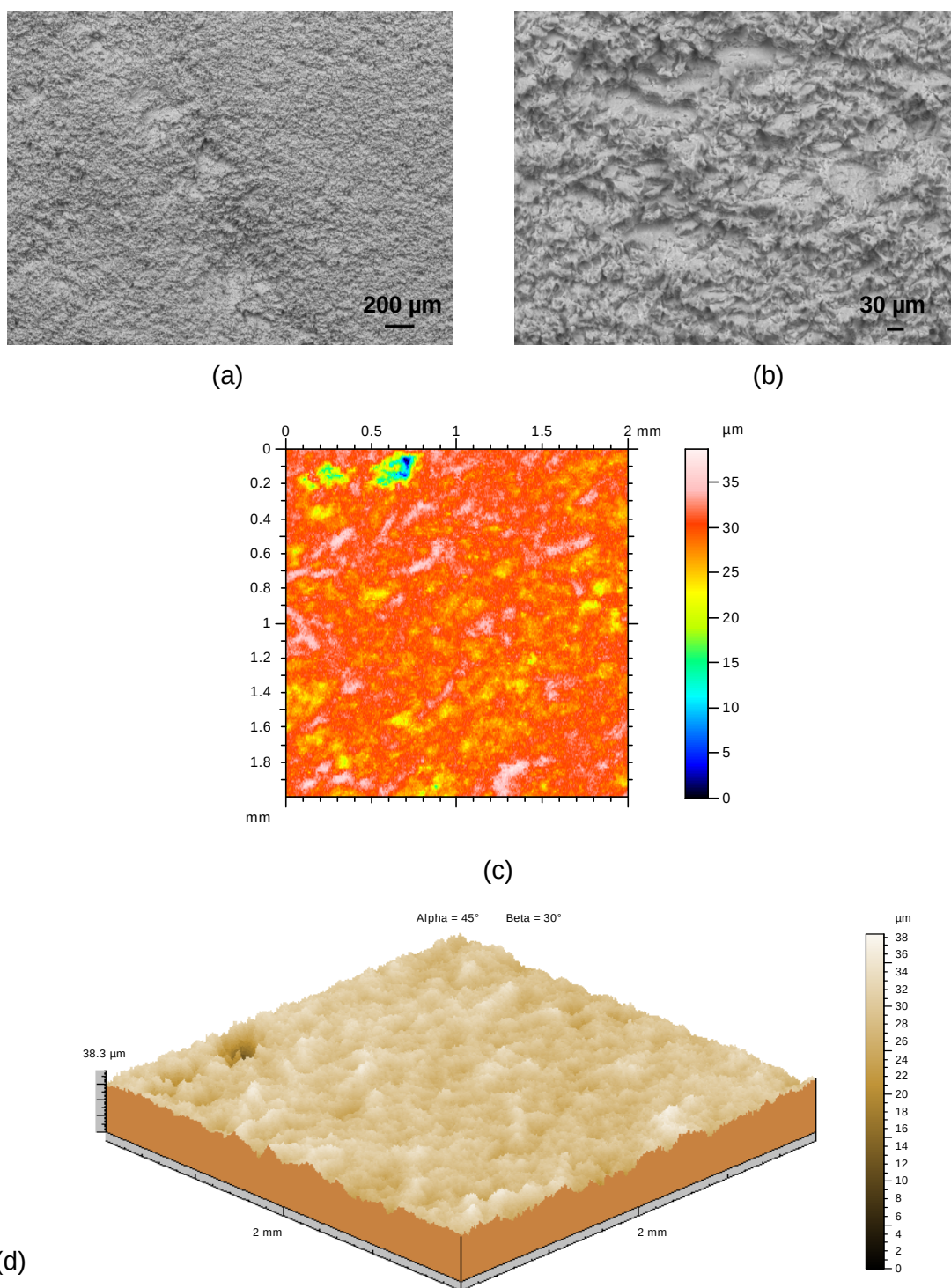


Figura 5.88 – Aspecto topográfico da amostra cavitada AF1, (a) MEV 500X, (b) MEV 2000X, (c) diagrama de nível (d) topografia tridimensional

Tabela 5.31 – Valores de rugosidade para amostra AF1 cavitada, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A _{Cav}	1,850	2,630	38,600	9,220	29,400	-1,790	14,100	5.89

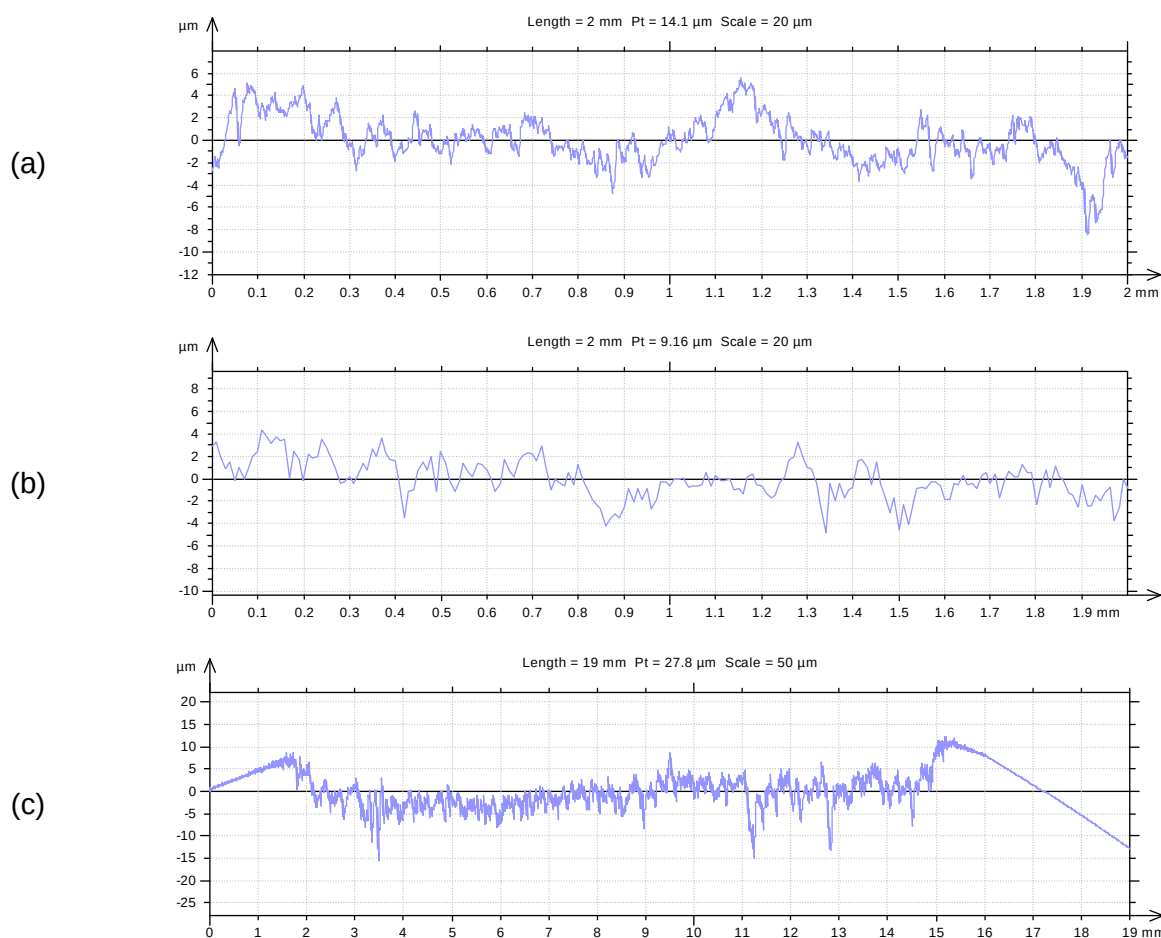


Figura 5.89 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil da seção longitudinal da amostra cavitada AF1

Alguns vales profundos isolados em forma de cratera foram observados na Fig. 5.88, tanto nas imagens obtidas pelo MEV quanto no interferômetro a laser. Este indicativo de que possam existir passes ou regiões do cordão de solda menos resistentes à cavitação também foram registrados através dos parâmetros de rugosidade, por exemplo, ao comparar os parâmetros St , Sp e Sv na Tab. 5.31. O valor elevado de Sku para a amostra AF1 corroboram a presença de vales profundos e crateras isoladas no cordão de solda, contribuindo no sentido de justificar a maior perda de massa apresentada pelas amostras soldadas pelo processo MIG/MAG arame frio.

Ao analisar o perfil longitudinal na Fig. 5.89 (c), nota-se que em ambas as extremidades direita e esquerda do perfil possuem picos de grande intensidade e um aprofundamento na vizinhança, indicando a presença de projeção de material nas bordas cavitadas. A região central possui uma rugosidade relativamente uniforme com algumas áreas de maior perda de massa e vales profundos nas posições entre 3 à 4 mm e 11 à 13

mm da Fig. 5.89 (c). O valor de R_v no perfil longitudinal chegou a valores da ordem de 4,86 μm .

Segundo Hattori e Mikami (2009), o fato observado na Figura 5.89 (c) ocorre porque a superfície original foi repetidamente exposta aos colapsos de bolhas durante a cavitação; portanto, sofreu uma deformação plástica devido às ondas de choque e micro jatos nos colapsos de bolhas. O colapso de bolhas, agindo repetidamente na área deformada, gera uma expansão gradual nos contornos de grãos cristalinos e deformação plástica acumulada. Uma vez que a superfície do material foi deformada plasticamente, partes expostas aparecem nos limites dos contornos de grãos cristalinos. A expansão produzida gera um degrau (*step*) em relação ao grão adjacente menos deformado plasticamente e causa uma alta concentração de tensões, resultando muitas vezes na iniciação de uma trinca.

A análise topográfica da amostra AF2 é apresentada na Fig. 5.90 com a presença de regiões com vales claramente visíveis (ver região direita da Figura 5.90 c e d). A Figura 5.91 (a) e (b) apresenta a avaliação linear no perfil leste oeste e norte sul, com a avaliação da seção longitudinal na Figura 5.91 (c).

A Figura 5.91 (a) apresenta em sua direita um vale profundo e de grande largura. De acordo com a Fig. 5.91 (c), as regiões da borda da amostra sofreram um aprofundamento com projeções para as laterais. Com relação aos parâmetros de rugosidade estão apresentados na Tab. 5.32 para AF2.

Tabela 5.32 – Valores de rugosidade para amostra AF2 cavitada, parâmetros em μm

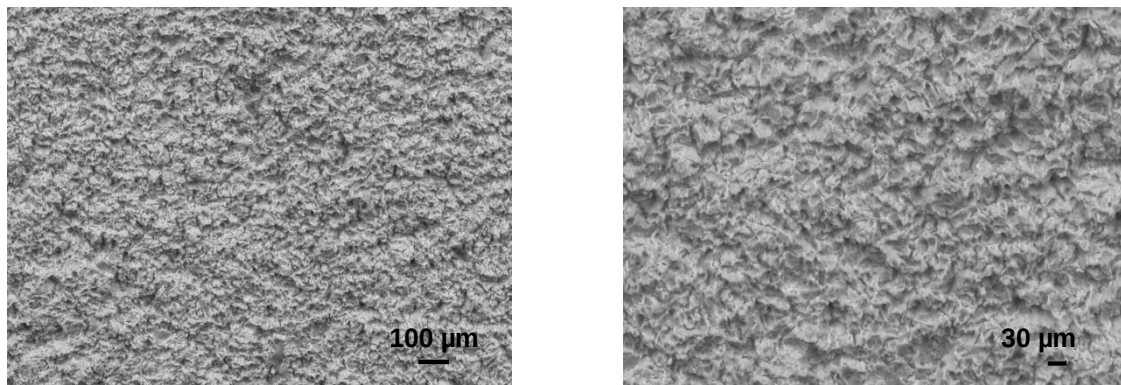
Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A_{Cav}	2,640	3,460	40,400	19,700	20,800	-0,837	4,560	5.91

Os maiores valores de Sa e Sq estão provavelmente relacionados à maior perda de massa. O parâmetro St aponta uma amplitude maior entre picos e vales, porém ao analisar Sp e Sv nota-se que são de intensidades proporcionais. O parâmetro Ssk negativo indica um perfil do tipo platô e um valor de Sku próximo a 4 aponta para a existência de uma distribuição normal.

A topografia da amostra DA4 é apresentada na Fig. 5.92. O perfil de rugosidade está na Fig. 5.93 e os valores dos parâmetros de rugosidade estão na Tab. 5.33.

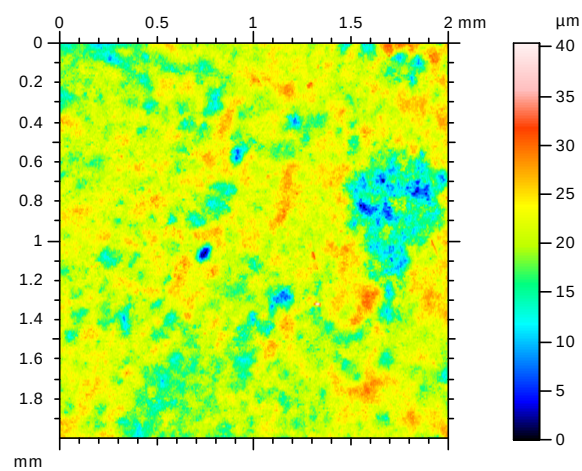
Tabela 5.33 – Valores de rugosidade para amostra DA4 cavitada, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A_{Cav}	1,930	2,460	22,400	8,360	14,000	-0,645	3,790	5.93

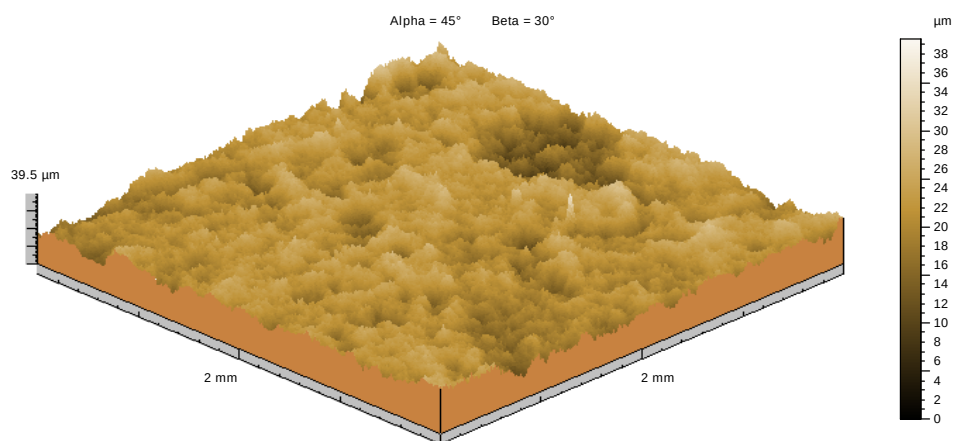


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 5.90 – Aspecto topográfico da amostra cavitada AF2, (a) MEV 1.000X, (b) MEV 2.000X, (c) diagrama de nível (d) topografia tridimensional

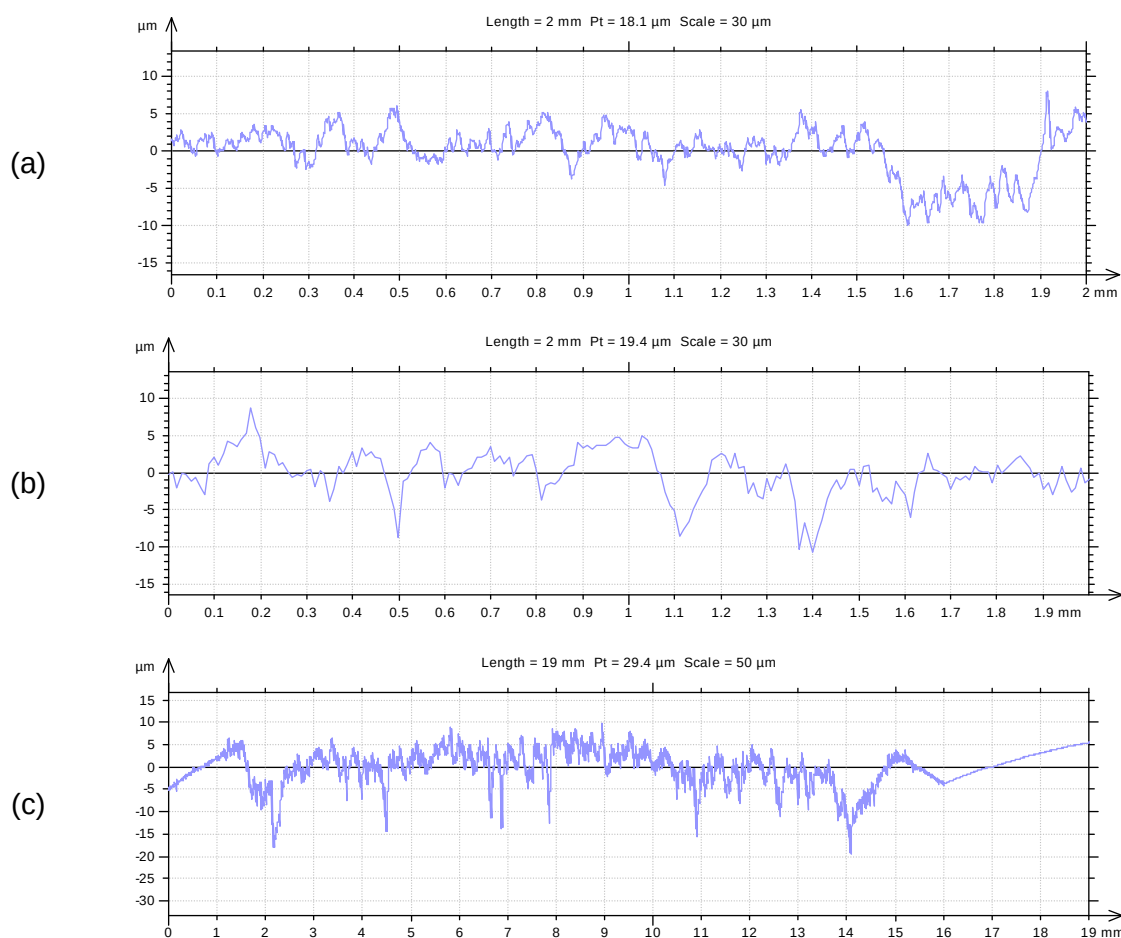


Figura 5.91 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil da seção longitudinal da amostra cavitada AF2

O ensaio DA4 apresentou comportamento intermediário para o desgaste entre as amostras em MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame série. Em relação à rugosidade, tem-se um comportamento similar para os parâmetros S_a , S_q , S_t , S_p e S_v .

A amostra DS1 tem sua topografia apresentada na Fig. 5.94 e na Fig. 5.95 seu perfil de rugosidade. Na Tabela 5.34 estão os resultados dos parâmetros de rugosidade.

Tabela 5.34 – Valores de rugosidade para amostra DS1 cavitada, parâmetros em μm

Local	S_a	S_q	S_t	S_p	S_v	S_{sk}	S_{ku}	Figura
A_{Cav}	1,370	1,740	18,400	5,740	12,700	-0,584	3,770	5.95

De forma geral, os parâmetros de rugosidade de DS1 como o S_a e S_q possuem valores menores do que os observados para MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame paralelo (Tab. 5.34).

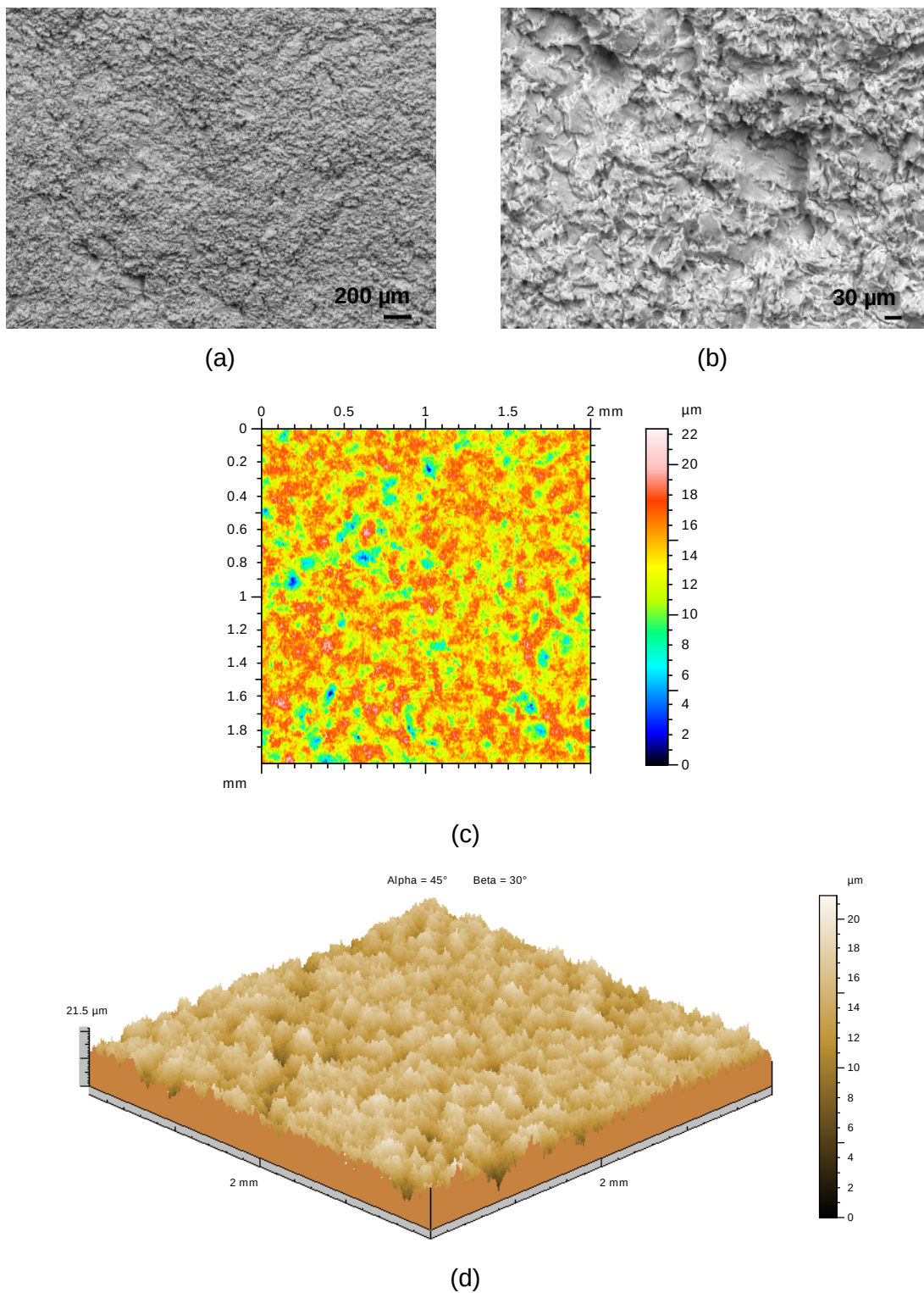


Figura 5.92 – Aspecto topográfico da amostra cavitada DA4, (a) MEV 500X, (b) MEV 2000X, (c) diagrama de nível (d) topografia tridimensional

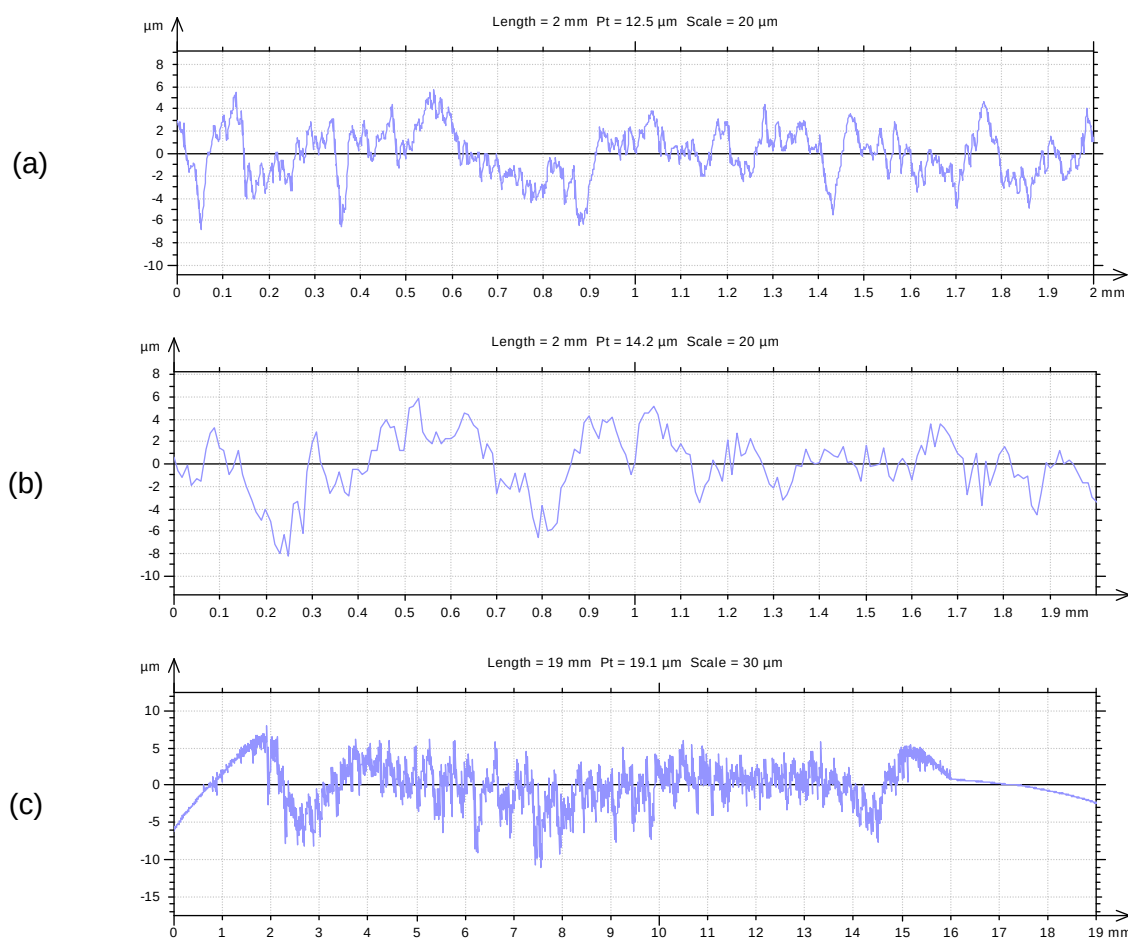


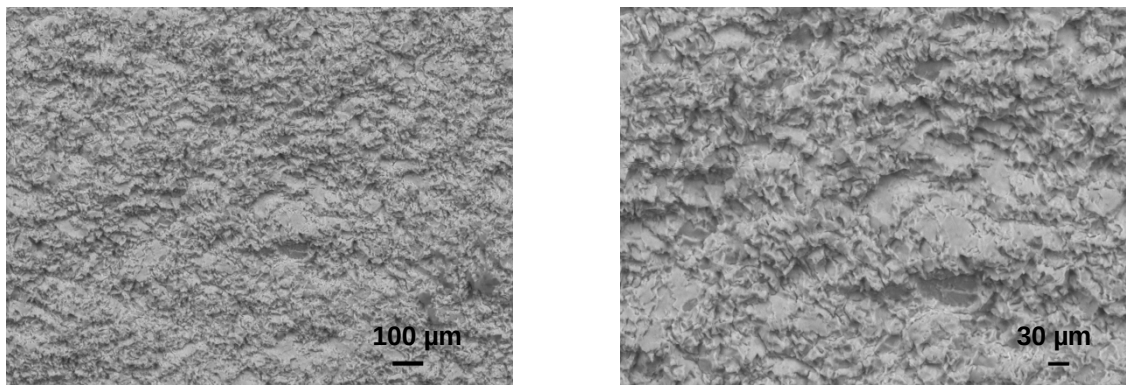
Figura 5.93 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil da seção longitudinal da amostra cavitada DA4

A projeção de material nas bordas também é reduzida (Fig. 5.96 c), em comparação aos demais ensaios. Entretanto, destaca-se a existência de vales pronunciados, como pode ser visto pela intensidade dos parâmetros St e Sv .

Nas Figuras 5.96 e 5.97 estão apresentadas as características topográficas da amostra DS2. Principalmente na Fig. 5.97 (d), existe visivelmente a presença de vários picos isolados na superfície. Os parâmetros de rugosidade para a amostra DS2 estão apresentados na Tab. 5.35.

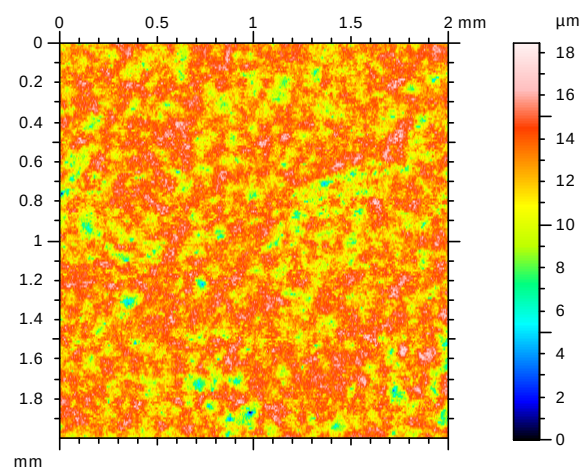
Tabela 5.35 – Valores de rugosidade para amostra DS2 cavitada, parâmetros em μm

Local	Sa /Ra	Sq/Rq	St/Rt	Sp/Rp	Sv/Rv	Ssk/Rsk	Sku/Rku	Figura
A_{Cav}	0,980	1,330	34,900	27,800	7,020	1,670	23,000	5.97

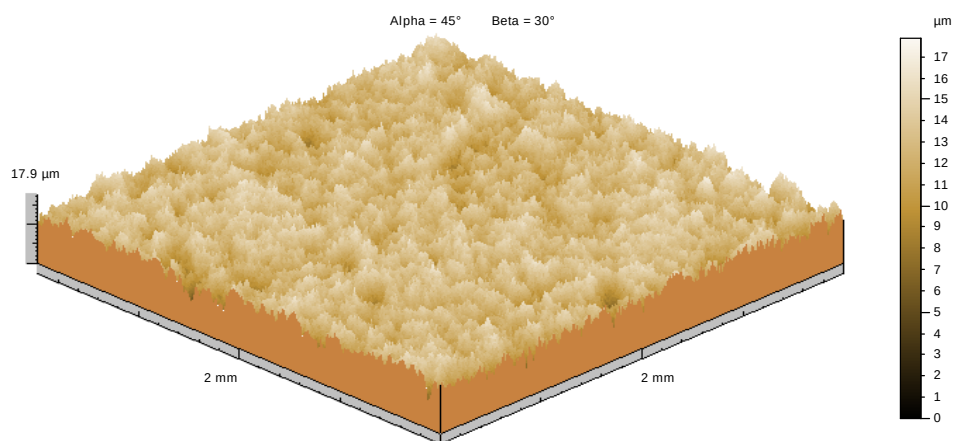


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 5.94 – Aspecto topográfico da amostra cavitada DS1, (a) MEV 500X, (b) MEV 2000X, (c) diagrama de nível (d) topografia tridimensional

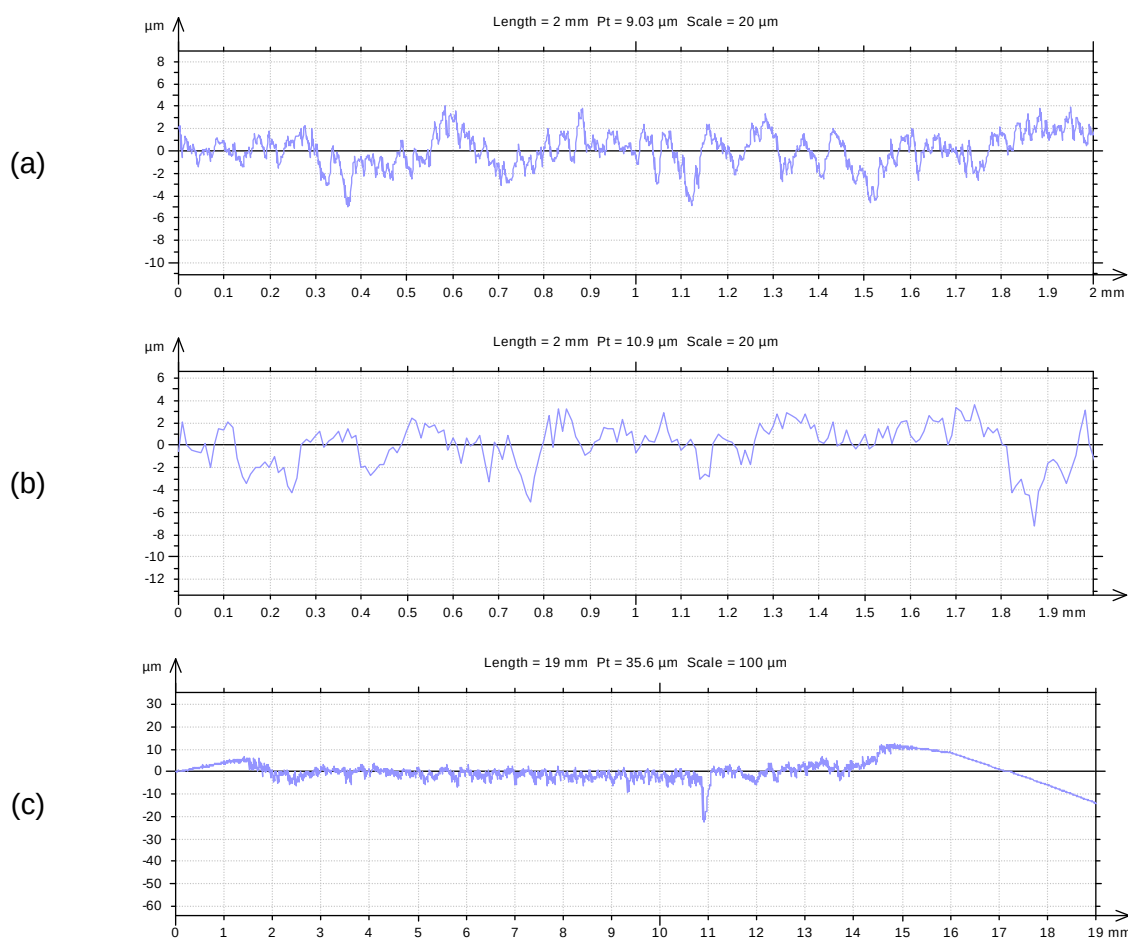


Figura 5.95 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) seção longitudinal da amostra cavitada DS1

Vale reforçar que a amostra DS2 apresentou os melhores resultados para a resistência à cavitação nos ensaios feitos com o metal de adição em aço inoxidável austenítico.

De forma geral, os parâmetros S_a e S_q de DS2 possuem valores inferiores aos demais ensaios. Como houve a presença de picos e vales isolados, os parâmetros S_t e S_{ku} são elevados. Outra constatação é de S_{sk} possuir valor positivo indicando a presença de picos com baixa densidade de material.

5.5.3. Análise final das amostras cavitadas

A Figura 5.98 apresenta os parâmetros de rugosidade de todos os ensaios após a cavitação. Nota-se que existe uma tendência de queda na rugosidade nos processos com menor desgaste por cavitação.

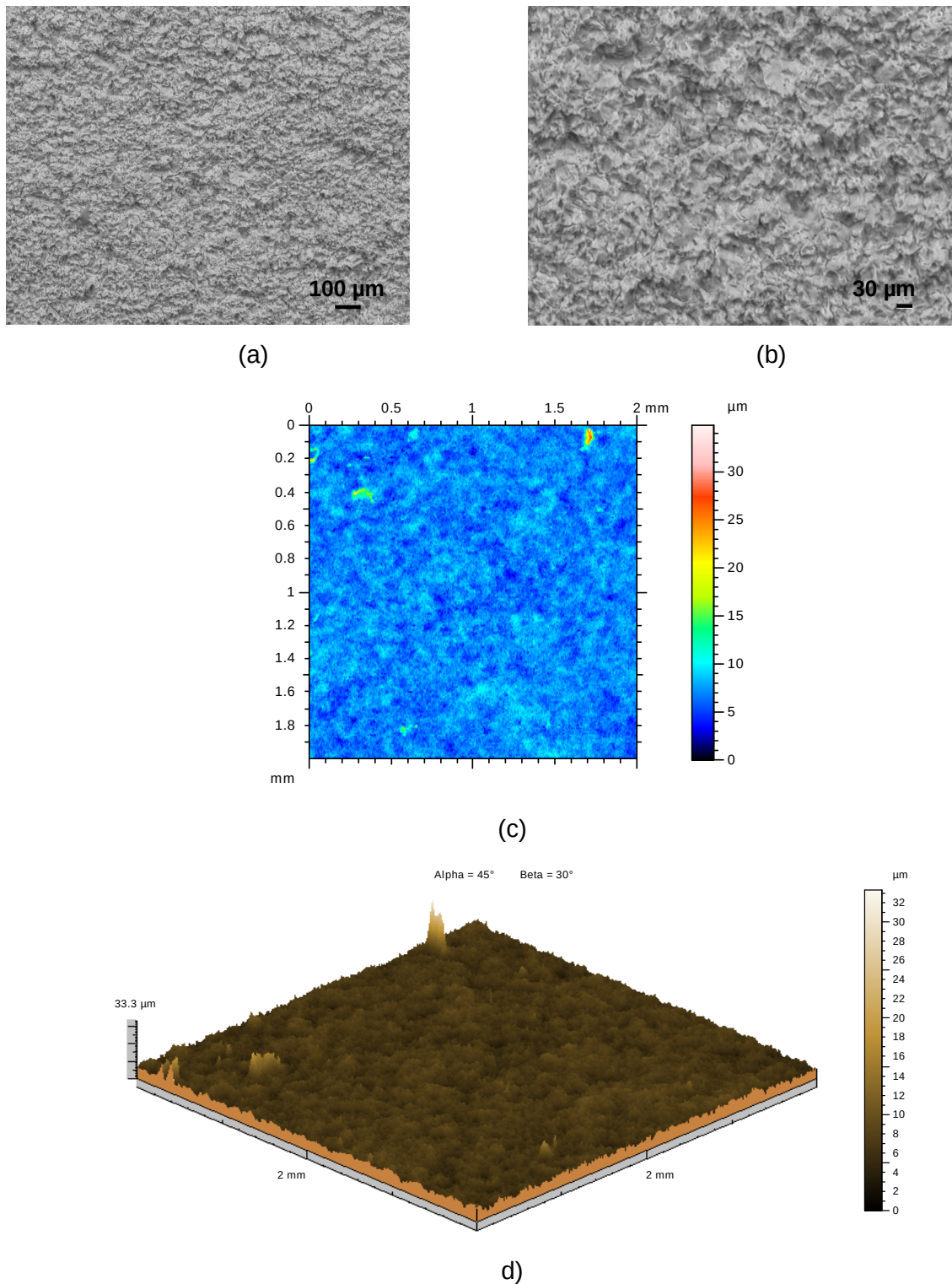


Figura 5.96 – Aspecto topográfico da amostra cavitada DS2, (a) MEV 500X, (b) MEV 2000X, (c) diagrama de nível (d) topografia tridimensional

A amostra AF2 apresentou desgaste (D) de 17,66 mg levemente maior do que AF1 com 17,23 mg. Porém, na Fig. 5.98, esta diferença entre S_a e S_q tornou-se muito superior. As amostras AF1, AF2 e DA4 possuem valores de desgaste próximos e aparentemente

estão com uma rugosidade (S_a e S_q) superior à DS1 e DS2. Portanto, o parâmetro desvio médio (S_a) e desvio médio quadrático (S_q) possui uma tendência de crescimento com o aumento do desgaste (D). Outra constatação é que provavelmente as amplitudes de picos e vales tenham um acréscimo com o aumento do desgaste o que pode ser percebido pela maior lacuna entre S_a e S_q , principalmente em AF2.

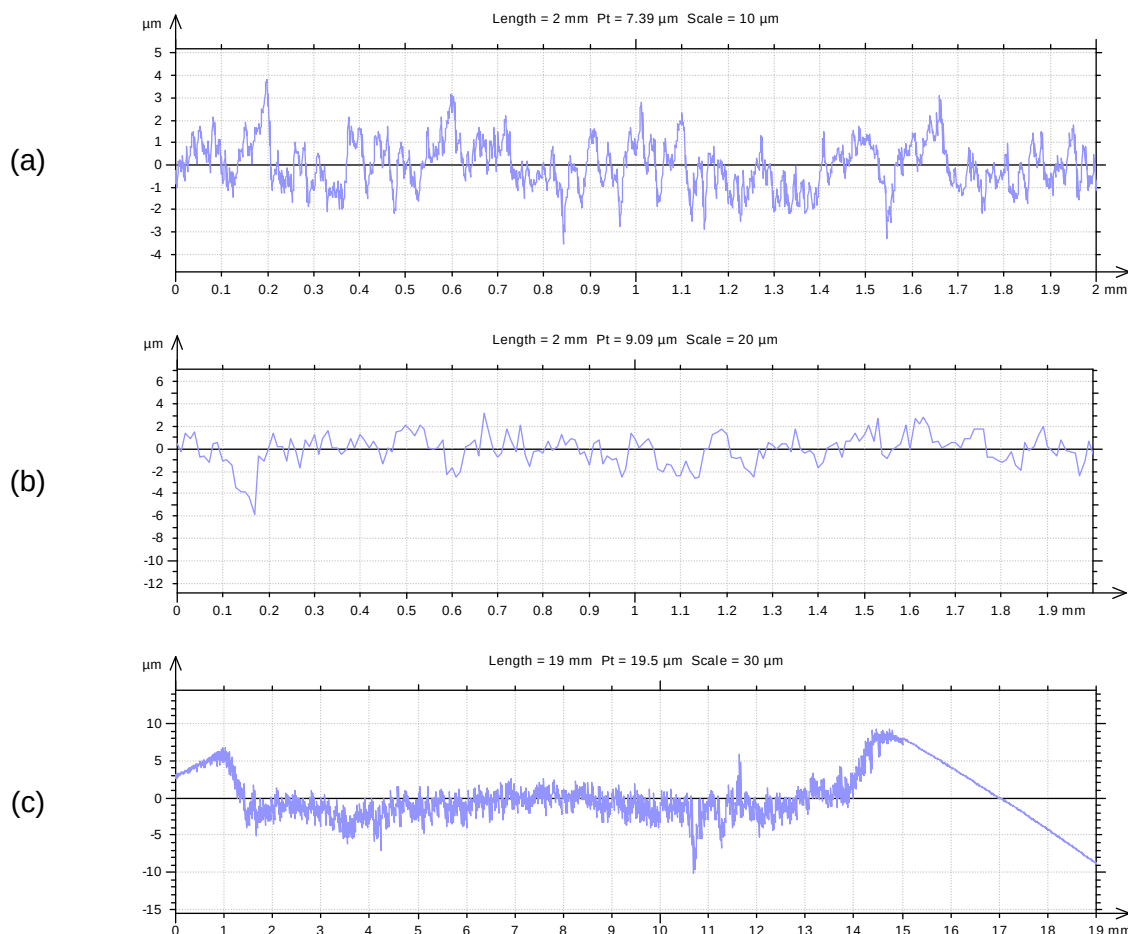


Figura 5.97 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) seção longitudinal da amostra cavitada DS2

Santa et al. (2011), avaliaram o aço inoxidável austenítico AWS E309, obtiveram um desgaste de aproximadamente 12 mg para 6 horas de cavitação, a uma taxa de 2,8 mg/h, com S_q de aproximadamente 3 μm ao final do ensaio. Os valores encontrados de S_q na Fig. 5.98 estão próximo de 3 μm , principalmente no caso das amostras do processo MIG/MAG arame frio que apresentaram os maiores desgastes.

A Figura 5.99 traz os valores dos parâmetros St , Sp e Sv para os ensaios de cavitação. As amostras em MIG/MAG arame frio apresentaram maior St do que as demais, ao mesmo tempo em que seu desgaste também foi superior. A amostra DS2 destaca-se

pelo elevado St , provavelmente fortemente influenciado pelos picos isolados de grande intensidade na sua superfície.

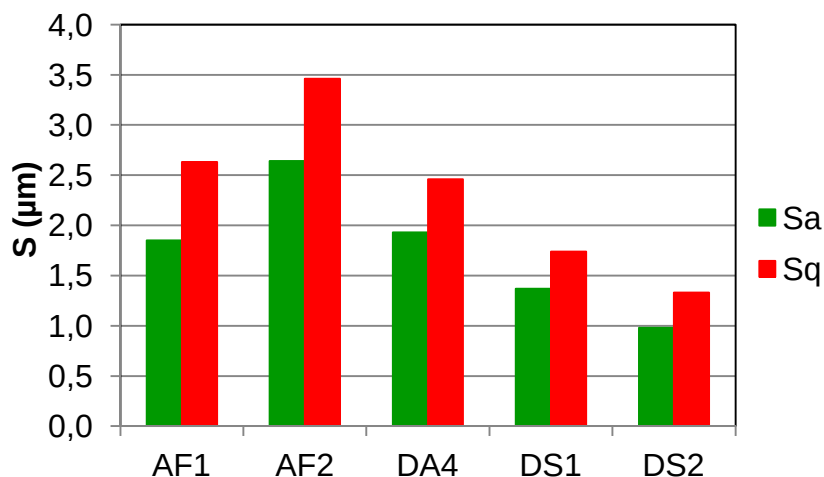


Figura 5.98 – Parâmetro Sa desvio médio aritmético do perfil e Sq desvio médio quadrático na cavitação

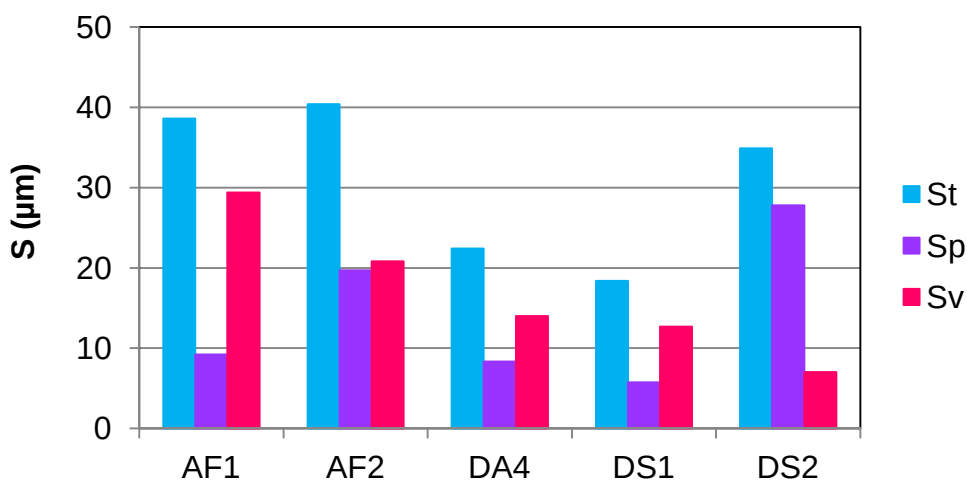


Figura 5.99 – Parâmetro St - soma dos maiores picos do perfil e maiores vales, Sp - a maior altura do pico e Sv - maior profundidade do vale

Em todas as amostras, o valor de Sv é sempre maior do que Sp , com exceção de $DS2$. O parâmetro Sv aparentemente tem uma tendência de amplificação com o aumento do desgaste, como se pode observar sua queda ao analisar o valor na direção de $AF1$ a $DS2$ na Fig. 5.99.

O fator de assimetria apresentou a variação mostrada na Fig. 5.100, destacando-se a assimetria positiva de $DS2$.

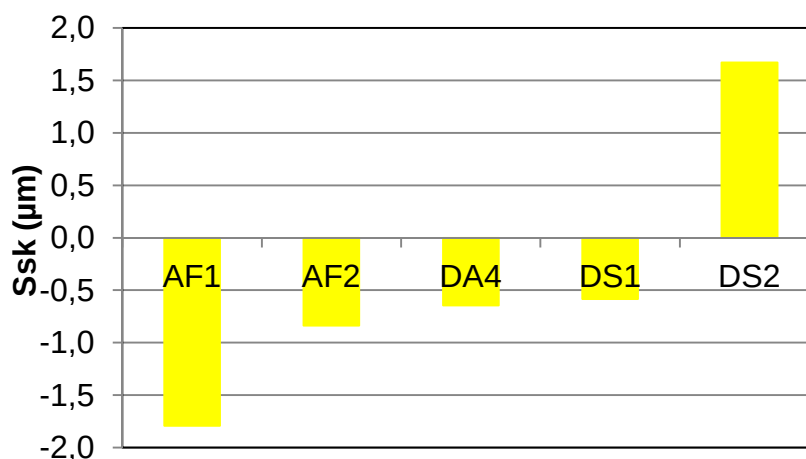


Figura 5.100 – Parâmetro Ssk fator de assimetria

Existe uma tendência de decaimento da assimetria (valores em módulo) com a redução do desgaste. O valor elevado e positivo da amostra DS2 está relacionado à presença de picos isolados com baixa densidade de material, como visto na Fig. 5.96.

As demais amostras possuem assimetria negativa com indicação de um perfil do tipo platô. A amostra AF1 tem em sua superfície vales isolados e profundos, indicado pelo elevado valor negativo de Ssk e comprovado pela Fig. 5.99, por isso Ssk é também elevado.

Na Figura 5.101, é mostrado o fator de achatamento do perfil (Sku) para todas as amostras cavitadas.

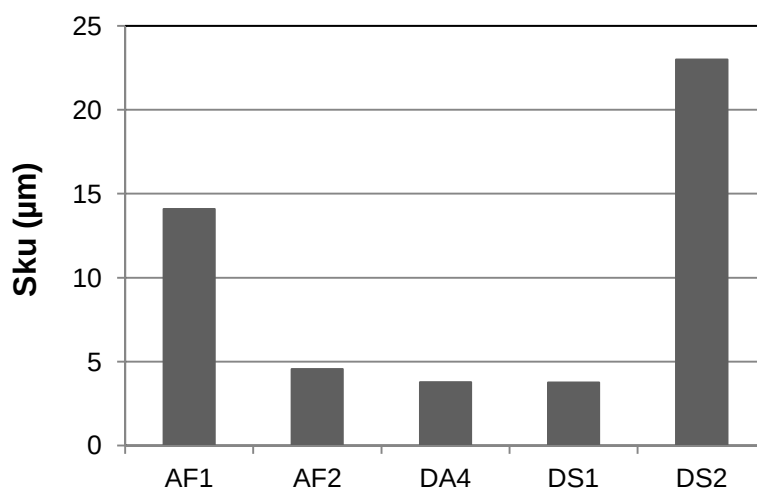


Figura 5.101 – Parâmetro Sku fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)

A indicação de que as amostras DS2 e AF1 apresentam elevados valores é consequência principalmente da presença de picos e vales pronunciados. Nos demais

ensaios, o valor de Sku maior do que 3 está indicando a presença de uma centralização da distribuição com valores de picos e vales próximos à média.

A Figura 5.102 apresenta os valores do coeficiente de assimetria (Ssk) e curtose (Sku). Se a distribuição das alturas segue um perfil de curva normal, o valor do grau de achatamento é igual a 3 e o coeficiente de assimetria, igual a zero. De uma maneira geral as amostras DS1 e DA4 são as mais próximas desta característica, destacando-se por um baixo valor de cavitação.

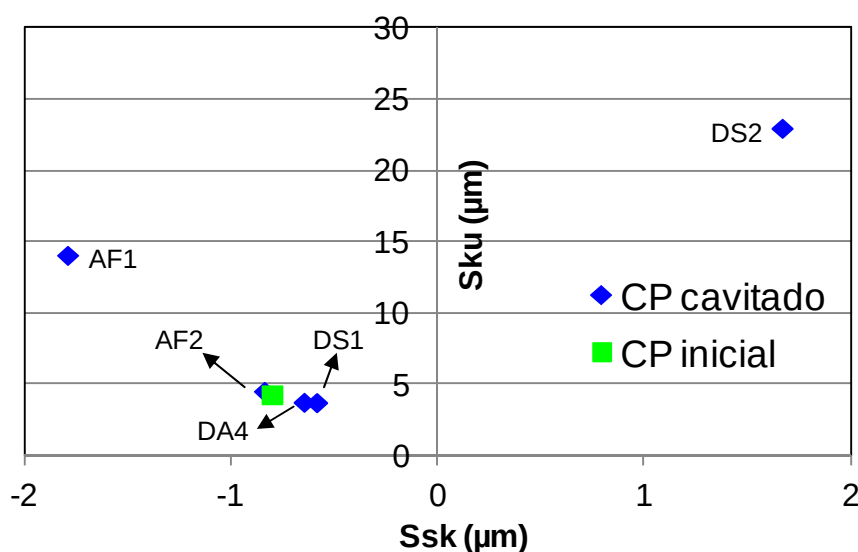


Figura 5.102 – Parâmetro Sku fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis) e Ssk fator de assimetria

O resultado AF1 destaca-se pela assimetria negativa, porém com elevado valor de Sku , provavelmente em consequência da presença de vales profundos. A amostra DS2 destaca-se por ser uma assimetria positiva e com Sku de alto valor, ocasionado pelas áreas com grandes relevos.

Com intuito similar ao caso da erosão pura, buscou-se avaliar a região erodida por cavitação na amostra AF1, com metodologia idêntica de mapeamento da região endurecida (ver Fig. 3.20 do Capítulo III).

Entretanto, como não foi possível notar diferenças significativas ao longo da espessura do corpo de prova, acredita-se que a camada formada por endurecimento na cavitação seja extremamente fina, não sendo possível sua mensuração pelo ensaio Knoop.

A Figura 5.103 e a Tab. 5.36 apresentam os resultados obtidos, sendo que na sequência do trabalho optou-se pela não realização desta análise para amostras cavitadas.

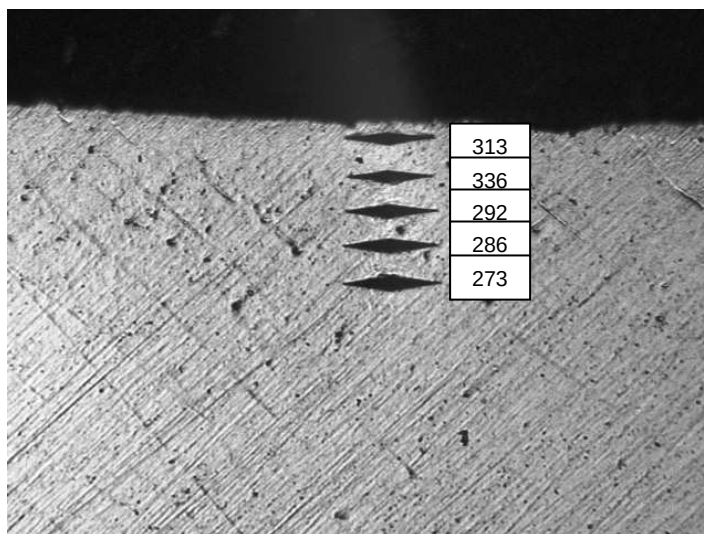


Figura 5.103 – Avaliação de dureza na região central (ponto 0) cavitada da amostra AF1

Tabela 5.36 – Região avaliada da amostra cavitada AF1, dureza em kgf/mm^2 , coordenadas x e y em mm

$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}$	-5,0	-2,5	-1,0	0	1,0	2,5	5,0	M	DP
0,000	252	238	324	313	309	286	342	295	38
0,025	304	287	290	336	311	302	295	304	17
0,050	260	266	292	292	294	306	262	282	19
0,075	251	245	242	286	294	284	275	268	22
0,100	262	241	232	273	281	267	262	260	17

5.6. Comentários Finais

- A soldagem com o processo MIG/MAG duplo arame com metal de adição em aço inoxidável austenítico apresentou um aspecto superficial adequado com alto rendimento de deposição, sendo em alguns casos, uma alternativa satisfatória para a soldagem de revestimento.
- Para a soldagem com MIG/MAG arame frio na posição horizontal, os valores observados para o desgaste em erosão pura e cavitação foram superiores, provavelmente devido à menor resistência mecânica do revestimento. A baixa diluição

proporciona uma microestrutura com menor dureza, sendo provavelmente necessária uma elevada deformação para ocorrência de transformações de fase, ao custo de alta perda de massa.

- A avaliação quantitativa da topografia por interferometria a laser permitiu caracterizar a morfologia das superfícies, além de auxiliar no entendimento dos mecanismos de desgaste.
- A erosão demonstrou que o uso do aço inoxidável austenítico, dependendo das condições de soldagem, pode alcançar desempenho satisfatório para resistir ao desgaste à 90°. Uma das hipóteses é de que a dureza superior alcançada pela superfície dos aços inoxidáveis austeníticos em função da presença de austenita deformada forneça uma maior resistência mecânica, reduzindo o desgaste. Estas observações sobre a existência de uma deformação residual estão de acordo com Weiyi et al. (2014). Provavelmente, as amostras de processos de alta energia como o MIG/MAG duplo arame passe por transformações de fase em períodos menores de tempo, gerando uma superfície altamente resistente ao desgaste.
- Na erosão, os parâmetros de rugosidade possuem desempenho similar nos valores intermediários de taxa de erosão. Neste caso, não se notou diferença sensível ao utilizar a taxa de erosão ou perda de massa acumulada durante a avaliação da rugosidade, pois possuem tendências idênticas.
- Na cavitação, a perda de massa acumulada foi menor para o processo de alta energia como no MIG/MAG duplo arame. O processo MIG/MAG arame frio novamente possui os maiores valores de desgaste na cavitação.
- De forma geral, uma baixa perda de massa para um mesmo período de ensaio por cavitação indicou que a distribuição dos picos e vales tende a seguir um aspecto de distribuição normal, como no caso de DA4 e DS1. Para uma perda de massa acumulada elevada, tende-se a obter uma superfície com os picos e vales de maior intensidade. Isto demonstra que podem existir regiões com microestruturas diferenciadas que proporcionam maior resistência à cavitação, como no caso perceptível das amostras AF1 e AF2.
- Os valores extremos de desgaste demonstram que para os ensaios em aço inoxidável austenítico podem surgir picos ou vales isolados que afetam os parâmetros de rugosidade. Na cavitação, um elevado desgaste proporciona um aumento nas medidas dos parâmetros relacionados aos vales (S_v em AF1), enquanto que uma baixa perda de massa proporciona maiores picos (S_p em DS2). Entende-se que os picos pronunciados observados para DS2 estejam ligados às regiões com microestruturas específicas e resistentes capazes de suportar mais fortemente ao desgaste da cavitação.